

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do desempenho do modelo numérico WRF para a simulação do clima em Portugal

Joana Sousa Negrão de Medeiros

Mestrado em Ciências Geofísicas

Especialização em Meteorologia

2011



UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA

Avaliação do desempenho do modelo numérico WRF para a simulação do clima em Portugal

Joana Sousa Negrão de Medeiros

Mestrado em Ciências Geofísicas

Especialização em Meteorologia

Trabalho de Projecto orientado pelos Prof. Dr. Pedro Miguel Matos Soares e

Dr.^a Rita Margarida Cardoso Tavares

2011

Abstract

A high resolution climate simulation of the Iberian Peninsula was performed with the Weather Research and Forecasting model (WRF) for the period 1989 - 2008. The assessment of the model results was performed through the comparison with ERA-Interim reanalysis (ERA-I), station observations from the Portuguese meteorological (IM) and water management services (INAG) and E-OBS regular grid.

Both ERA-I and WRF's temperature, precipitation and wind are in good agreement with the station observations (IM and INAG). The negative maximum temperature bias inherent to the reanalysis is partially corrected in the regional WRF simulations; correspondingly the minimum positive temperature bias is also reduced. WRF outperforms ERA-I temperature and precipitation correlations. Precipitation bias in WRF 9km is lower than ERA's, predominantly in the rainy seasons and WRF is able to reasonably represent the wind speed in the coastal areas.

When E-OBS is used, ERA-I is closest except in the depiction of high intensity events, where WRF achieves better results. Note that E-OBS is constructed from an interpolation of 26 station observations which is insufficient to represent the complexity of the spatial distribution of these variables.

WRF is able to reasonably depict the high spatial heterogeneity of temperature and precipitation, as well as simulating extreme events.

Key-words: Regional Climate Modelling, WRF model, High resolution, Climatology, ERA-Interim, Portugal

Resumo

Este trabalho tem por base uma simulação de alta resolução do clima da Península Ibérica efectuada com modelo WRF (Weather Research and Forecasting) para o período 1989 - 2008. Os resultados foram comparados com a reanálise ERA-Interim (ERA-I), com observações locais do Instituto de Meteorologia (IM), com observações locais do Instituto da Água (INAG) e com a grelha de observações E-OBS.

Genericamente, na comparação com as observações, tanto o modelo WRF como a reanálise, ERA-I, demonstram um bom desempenho na simulação de temperatura, vento e precipitação. Para a temperatura máxima (Tmax), a simulação regional apresenta uma redução e correcção do viés negativo inerente ao modelo de forçamento (ERA-I) em todas as estações do ano. No caso da temperatura mínima (Tmin), a correcção não é tão significativa como em Tmax. Tanto para Tmax como para Tmin, em relação às estações locais e para vários intervalos temporais, o modelo WRF denota correlações mais elevadas que a reanálise. O domínio WRF 9km apresenta também viés mais baixos em todos os domínios temporais especialmente nas estações do ano com mais precipitação. A avaliação do vento evidencia a capacidade do WRF de representar a intensidade do vento nas regiões costeiras.

A comparação dos modelos com a grelha E-OBS foi realizada para todas as variáveis, excepto o vento. Nesta, a ERA-I apresenta genericamente melhores resultados, especialmente para as variáveis Tmax e Tmin. Porém, o WRF continua a mostrar uma maior qualidade na descrição dos extremos da grelha E-OBS. No entanto, a grelha E-OBS parece não caracterizar correctamente a heterogeneidade espacial destas variáveis no território, pois a interpolação espacial baseia-se apenas em 26 estações observacionais.

Para todas as variáveis, o modelo WRF demonstra ainda a sua capacidade em simular as heterogeneidades espaciais inerentes às observações locais das variáveis em estudo, bem como a representação de eventos extremos.

Palavras-chave: Modelação Regional de clima, modelo WRF, Alta resolução, Climatologia, ERA-Interim, Portugal

Índice

Índice.....	4
1. Objectivos.....	1
2. Introdução	2
3. Breve caracterização climática de Portugal.....	4
4. Simulação WRF e Observações	6
4.1 A simulação WRF	6
4.2 Dados Observacionais	8
4.2.1 Rede de observações locais	8
4.2.2 Grelha de Observações E-OBS	8
5. Resultados	9
5.1 Validação da Simulação Regional WRF	9
5.1.1 Avaliação Global.....	10
5.1.2 Temperatura máxima.....	21
5.1.3 Temperatura mínima	31
5.1.4 Precipitação	41
6. Conclusões	52
7.Referências	55
ANEXO.....	59

1. Objectivos

O trabalho desenvolvido na presente tese enquadra-se no projecto REWRITE (REgional clouds and WateR balance In a changing climate) que se propôs a produzir um conjunto de novos cenários de alterações climáticas para a Península Ibérica e avaliar o seu impacto em vários sectores económicos, com especial ênfase sobre os recursos hídricos da Península Ibérica. Para tal recorreu-se ao modelo *state-of-the-art* de previsão numérica WRF3.1 no seu modo regional e climático. O modelo foi integrado em dois domínios, um primeiro que abrange boa parte da Europa e do Atlântico Norte e, um segundo domínio, aninhado que cobre toda a Península Ibérica, com uma resolução de 9km. A simulação foi forçada lateralmente pela reanálise ERA-Interim para o período de 1989 a 2008. Uma resolução de 9km trata-se de um espaçamento muito fino para fins climáticos e sem precedentes a nível Europeu. A resolução dos modelos é um factor determinante para simular de forma realista as variáveis atmosféricas, nomeadamente em regiões com fortes contrastes costeiros e orográficos, como é o caso da Península Ibérica. Porém, a qualidade e o valor acrescentado que este tipo de resoluções gera na representação das variáveis médias da atmosfera não é consensual (Fezer *et al.*, 2011). Estes são fortemente dependentes do modelo regional utilizado, das suas parametrizações, do horizonte temporal em simulação e da região abrangida (Laprise *et al.* 2008).

Os objectivos fundamentais desta tese foram o exame exaustivo da qualidade dos resultados da simulação climática WRF na representação das variáveis de superfície, de modo a classificar qual o seu potencial para, por um lado, estabelecer uma base climatológica de alta resolução do clima presente e, por outro, a sua utilização para quantificar o impacto das alterações climáticas em Portugal Continental. As variáveis de superfície abrangidas neste estudo foram as temperaturas máxima e mínima, a precipitação e o vento. Os resultados da simulação foram comparados com dados observacionais das estações automáticas do Instituto de Meteorologia (IM), do Instituto das Águas (INAG) e da base de dados europeia de observações grelhadas para a Europa E-OBS v.4 (Haylock *et al.* 2008, Klok e Klein Tank, 2009) (E-OBS0.25).

Por último, e de uma forma preliminar pretendeu-se caracterizar o valor acrescentado na previsão da precipitação associado à utilização do modelo WRF em alta resolução, seguindo os trabalhos de Di Luca *et al.* (2011), em que se estima o acréscimo de variabilidade extrema produzido pelo modelo, relativamente ao forçamento de larga escala.

2. Introdução

Nos últimos anos, os resultados de modelos globais de clima (GCMs, Global Climate Models) para previsão do tempo permitiram o desenvolvimento de um número crescente de bases de dados climatológicas como ERA-40 (Kalberg *et al.* 2004), ERA-Interim (Berrisford *et al.* 2009), NCEP (Kalnay *et al.* 1996) e Twentieth Century Reanalysis (Compo *et al.* 2011), entre outras. Em simultâneo, foram integrados um grande número de GCMs de modo a apoiar a construção de bases de dados climatológicas para o clima presente e futuro, com o propósito de analisar e estudar o impacto das alterações climáticas a nível global devido às emissões antropogénicas. Este esforço tem sido bem-sucedido na criação de grelhas regulares contendo a informação climática a nível global para o séc. XX colmatando, assim, falhas espaciais e temporais nas observações.

Todavia, os modelos GCMs possuem uma resolução espacial relativamente imprecisa de 1° a 4° de resolução tanto em latitude como em longitude. Embora estes modelos demonstrem uma boa representação da circulação de larga escala, não conseguem representar a variabilidade climática local e regional, as escalas espaciais em que as consequências das alterações climáticas serão sentidas. Estas limitações são especialmente amplificadas em áreas com uma geomorfologia complexa, tais como a presença de orografia e contrastes terra-mar intensos. De modo a representar estas escalas, diferentes métodos foram desenvolvidos, estatísticos e dinâmicos, para realizar o downscaling dos campos atmosféricos de larga-escala. Os modelos regionais de clima RCMs (Regional Climate Models) forçados pelos GCMs são uma metodologia de downscaling dinâmico muito utilizada hoje em dia, que permite representar mais adequadamente as circulações regionais e locais, associadas a topografia complexa e a presença de contraste terra/mar (Mass *et al.*, 2002; Salathé *et al.*, 2008), e deste modo fornecer climatologias de alta resolução para regiões geomorfologicamente complexas e muitas vezes escassas em redes de observação.

Recentemente, a nível europeu foi realizado um grande esforço de modelação climática de alta resolução no âmbito dos projectos europeus PRUDEDENCE (Christensen *et al.* 2002, Christensen *et al.* 2007) e ENSEMBLES (van der Linden and 76 Mitchell, 2009). Nestes projectos diversos modelos numéricos foram integrados para o clima presente e futuro com resoluções de 50 e 25km. Para aferir a sua qualidade foram efectuadas simulações forçadas pela ERA-40 e ERA-Interim e comparados os seus resultados com observações, na sua maioria, corrigidas em grelhas regulares, como o Climate Research Unit (CRU) (Mitchell and Jones 2005) e a grelha de observações do projecto ENSEMBLES E-OBS (Haylock *et al.* 2008, Klok *et al.* 2009). Os resultados destes modelos constituíram um importante avanço na modelação climática europeia, nomeadamente, no conhecimento do impacto climático, porém, diversos estudos mostraram que o tipo de resoluções utilizada é ainda insuficiente para bem descrever a fenomenologia local, associada à camada limite, à topografia e zonas costeiras complexas, por exemplo, na Noruega por Barstad *et al.* 2009 e Heikkilä *et al.* 2010. Estes últimos autores utilizaram uma resolução de 10km e mostraram grandes benefícios deste tipo de espaçamento. Por outro lado, uma maior resolução não é uma garantia de melhor desempenho em determinadas regiões e períodos (Rauscher *et al.* 2009), especialmente no caso da precipitação (Brankovic and Gregory, 2001; Zhang *et al.*, 2009).

O modelo Weather Research and Forecast (WRF, Skamarock *et al.* 2008) apesar de desenvolvido para a previsão do tempo e investigação é presentemente utilizado também como modelo climático. Por exemplo, foi usado recentemente sobre regiões de complexa geomorfologia como a Califórnia (Caldwell *et al.*, 2009), o Pacífico Noroeste (Zhang *et al.*, 2009) e a Noruega (Heikkilä *et al.* 2010), revelando um bom desempenho neste modo de simulação.

Portugal Continental, devido à sua complexa geomorfologia e uma fraca rede de observações, é um bom exemplo da necessidade de modelação climatológica de alta resolução. Localizado a Sudoeste da Europa, apresenta uma geografia meridional com uma costa alongada, com um comprimento de cerca de 600 km por 150 km de largura, e possui uma climatologia fortemente dependente do contraste terra/mar e da orografia, nomeadamente no seu padrão de precipitação e vento.

Importa ainda referir que a rede de estações observacionais, no continente português, contém apenas 42 estações para temperatura e vento do Instituto Português de Meteorologia (IM), o que corresponde a uma descrição espacial escassa do território, e no caso da precipitação a rede de estações do INAG (SNRHI, 2010, Instituto 211 da Água) possui cercar de 900 estações, mas de qualidade e períodos abrangidos muito díspares, o que resulta numa distribuição bastante heterogénea, com algumas regiões do território com uma concentração elevada de estações, contrastando com algumas zonas pouco cobertas ou mesmo com estações inexistentes.

Este estudo versa sobre os resultados do modelo WRF de uma simulação de 20 anos, com dois domínios de alta resolução, de 27 e 9km, centrados na PI. Esta simulação foi forçada pela reanálise ERA-Interim, para o período de 1989-2008. Os campos de superfície, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e intensidade do vento resultados da simulação WRF são avaliados relativamente às observações pelo cálculo de diversas medidas de erro estatísticas. Os dados observacionais das estações meteorológicas foram validados de forma a obedecerem a um conjunto de critérios de qualidade, o que permitiu constituir uma base de dados observacional para o período da simulação de 32 estações para as temperaturas e vento, e 308 de precipitação. A simulação é ainda avaliada através da comparação com a base de dados observacionais E-OBS, correspondente a uma malha regular de observações com 0.25 graus de resolução sobre todo o território europeu.

A opção de comparar fundamentalmente os resultados do WRF com estações pontuais é baseada em dois aspectos; em primeiro lugar, a alta resolução do modelo de 9km é mais fina do que a das grelhas de observação disponíveis, a grelha E-OBS possui dados diários a 0.25° de resolução, e a base de dados CRU (Climate Research Unit) CRUv.TS3 valores mensais a 0.5° (Mitchell e Jones 2005) mensais, e por último Belo-Pereira *et al.* (2011) só tem valores de precipitação a 0.2° (IB0.2). Em segundo lugar, estas grelhas foram construídas, sobre Portugal, recorrendo a poucas estações de observação, o que suscita problemas relativos aos processos de interpolação e de suavizamento dos dados de temperatura e precipitação, problemas esses mais agravados para os valores de extremos (Hofstra *et al.* 2009a, 2009b).

Apesar dos problemas mencionados na utilização de grelhas, estas continuam a ser muito utilizadas, especialmente em regiões com pouca cobertura de observações, zonas onde as grelhas de observação cobrem a escassez de estações pontuais. Desta forma tornou-se também imperativo uma comparação dos modelos com a grelha regular E-OBS para precipitação, temperatura máxima e mínima.

3. Breve caracterização climática de Portugal

Entre os 37° e 42° N de latitude, Portugal Continental encontra-se na região de transição entre o anticiclone subtropical e a depressão subpolar. Para além da latitude, os factores que influenciam o clima de Portugal Continental são a sua complexa orografia e o efeito do Oceano Atlântico. No que diz respeito à altitude, os valores mais elevados variam entre os 1000 m e 1500 m com excepção da Serra da Estrela que atinge os 2000 m. No que diz respeito à geografia continental, as regiões mais afastadas do Oceano Atlântico estão a cerca de 220 km da costa.

Apesar da variação dos factores climáticos ser pequena ela é suficiente para justificar variações na temperatura do ar e principalmente na precipitação. Enquanto o Noroeste de Portugal é uma das regiões mais húmidas da Europa, com uma média de precipitação anual acumulada na ordem dos 3000 mm, no interior do Alentejo essa média ronda os 500 mm, denotando também uma grande variabilidade interanual. Tal como noutras regiões a Sul da Europa, Portugal é um local com um clima mediterrânico temperado, mas com conhecida vulnerabilidade às variações climáticas, nomeadamente a secas e desertificação no sector sul.

O clima é uma mistura complexa de vários elementos tais como a temperatura, a humidade, o vento, a precipitação, a cobertura de nuvens etc., que contribuem para definir física e quimicamente o ambiente à superfície.

Miranda *et al.* (2002, 2006) apresentou uma climatologia para Portugal Continental baseada nas escassas estações de observação do IM, cobrindo o período de 1961-1990 para estas duas variáveis, salientando os seguintes pontos: - valores de temperatura média do ar - que variam entre os 7 °C no interior da região montanhosa no centro de Portugal e os 18 °C na região costeira a Sul. Os valores médios mensais variam regularmente ao longo do ano, atingindo um máximo em Agosto e um mínimo em Janeiro. Durante o Verão, os valores médios de temperatura máxima variam entre os 16 °C na Serra da Estrela e os 32-34 °C no interior da região centro e a Este do Alentejo. Quanto aos valores médios da temperatura mínima durante o Inverno, estes variam entre os 2 °C nas regiões montanhosas do interior e os 12°C no Algarve.

O número de dias no ano com um mínimo abaixo dos 0 °C (*frost days*) atingem um máximo nas terras altas do interior norte e centro, com mais de 100 dias/ano, e é nulo na costa Oeste e na região Sul. O número de dias com temperatura mínima acima dos 20 °C (*tropical nights*) e máxima acima dos 25 °C (*summer days*) e acima dos 35 °C (*hot days*) é mais elevado no interior da região centro, a Este do Alentejo e na costa Algarvia. Estas estatísticas são indicadores de ondas de calor e arrefecimento súbito no clima português, com impacto significativo na agricultura e outros sectores primários.

A precipitação acumulada anual média para Portugal Continental é aproximadamente de 900 mm, com grande variação espacial. Os valores mais elevados, acima dos 3000 mm encontram-se nas terras altas da região Noroeste (Minho) e os mais baixos, por volta dos 500 mm, na costa Sul e a Este do território. Em média, cerca de 42% da precipitação anual ocorre nos três meses de Inverno (Dezembro a Fevereiro) e os valores mais baixos durante o Verão (Junho a Agosto) correspondendo a 6% da precipitação anual.

Durante os meses de transição (Março a Maio e Outubro a Novembro) a quantidade de precipitação é muito variável. O número médio de dias/ano de precipitação igual ou superior a 10 mm varia entre 15 a 25 dias a Sul e a Nordeste, e de 50 a 60 dias a Noroeste e nas Terras Altas. Finalmente os ciclos anuais tanto de precipitação (médias mensais) como de temperatura (mínimos e máximos médios mensais) na maior parte das estações sinópticas, revelam a existência de um período de Verão seco e quente em todas as estações utilizadas, característica de um clima Mediterrânico.

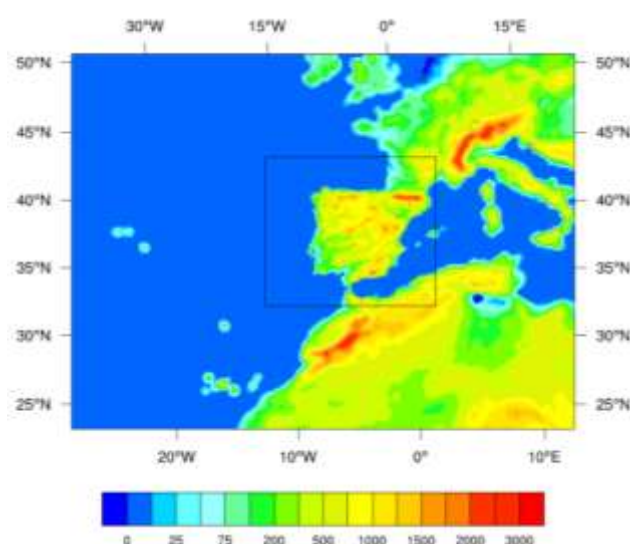
4. Simulação WRF e Observações

4.1 A simulação WRF

Neste estudo foi utilizado o modelo WRF (Weather Research and Forecasting) no seu modo climático para realizar uma simulação de 20 anos de alta resolução, com dois domínios aninhados centrados na PI, um de 9km e outro de 27km, realizando o downscaling da reanálise ERA-Interim para a PI. Ambas as malhas estão centradas na PI, têm 162x135 and 144x111, pontos de grelha, respectivamente, e um total de 49 níveis para os dois domínios do modelo (Figura 1a), cujo topo é limitado pelos 50hPa.

O modelo WRF (Skamarock *et al.* 2008) é um modelo não hidrostático, apropriado para simular escalas espaciais desde os milhares de quilómetros até uma dezena de metros. O WRF possui um considerável número de esquemas dinâmicos e parametrizações físicas, tornando-o adequado para a previsão numérica, a simulação de clima e LES. O domínio exterior cobre uma considerável área para assegurar uma boa representação dos sistemas sinóticos que se aproximam da PI, enquanto que o domínio menor tem uma resolução horizontal alta na tentativa de melhor simular os processos térmicos e topográficos no escoamento atmosférico. No mesmo sentido optou-se por concentrar 20 níveis verticais na camada limite atmosférica.

a)



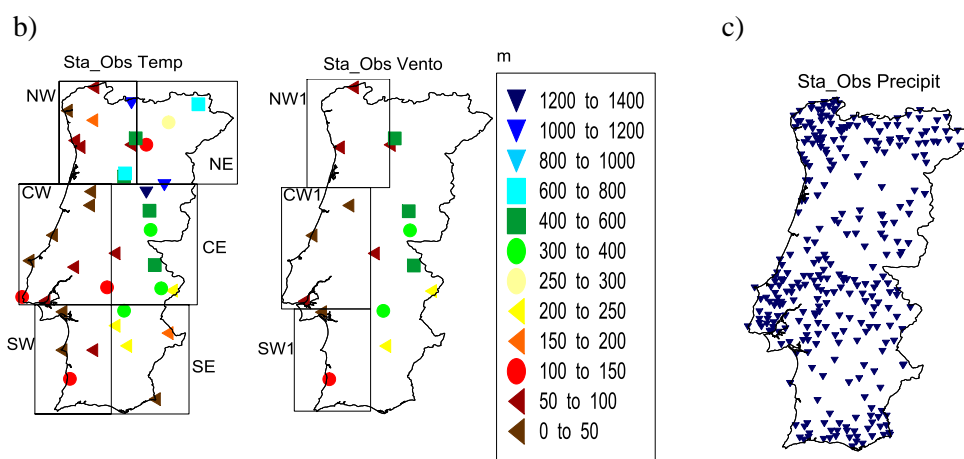


Fig. 1- a) Domínios do modelo WRF: domínio exterior, resolução $dx=27km$, domínio interior (rectângulo) $dx=9km$, limitando a Península Ibérica. A escala de cores representa a orografia; b) Estações meteorológicas do IM (Instituto de Meteorologia) para temperatura e vento (com a respectiva altitude); c) Rede de estações udométricas do INAG (Instituto da Água).

As parametrizações físicas usadas na simulação incluem o esquema de microfísica de Duplo-Momento de 6 classes (mp6) de Hong *et al.* (2006), o esquema de Mellor-Yamada-Janjic (Janjic, 2001) para a camada limite planetária e o esquema de cumulus de Betts-Miller-Janjic (BMJ) (Betts 1986; Betts e Miller 1986; Janjic 1990, 1994, 2000). O modelo de superfície utilizado é o modelo de 4 camadas LSM-4 de Noah (Chen, F. and J.Dudhia, 2001; Ek *et al.*, 2003) e o esquema de radiação inclui os esquemas para ondas longas e ondas curtas do NCAR (Collins *et al.* 2004).

A corrida WRF foi iniciada para as 0000UTC do dia 1 de Janeiro de 1989 e terminou às 0000UTC do dia 1 de Janeiro de 2008. O primeiro mês foi considerado como spin-up do modelo. As condições iniciais e as de fronteira lateral para o domínio exterior foram impostas pela reanálise ERA-Interim durante todo o período de simulação, sendo estas actualizadas a cada 6 horas de simulação, com nudging activo.

Uma ilustração da orografia de alta resolução, dos modelos (WRF 9km, WRF 27km e ERA-Interim) e da grelha E-OBS pode ser observada na Figura 2.

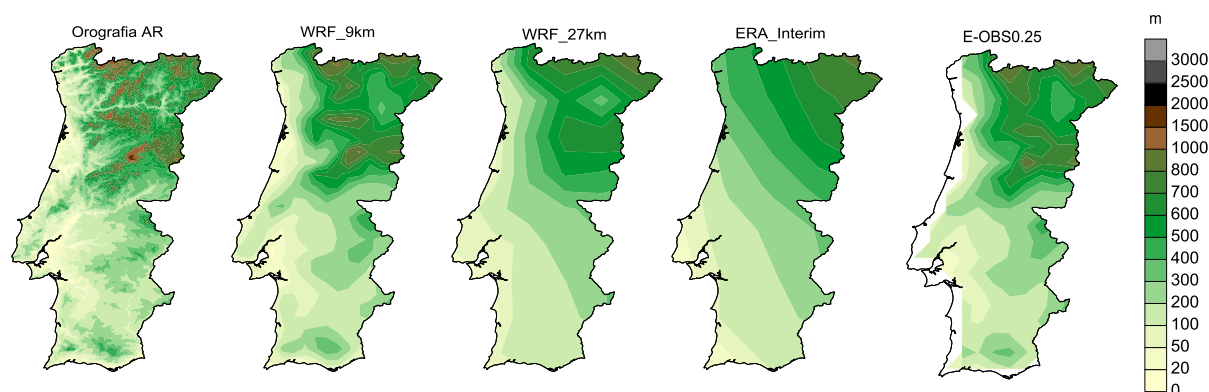


Fig. 2 – Topografia de alta resolução GTOPO-30 (à esquerda), topografia dos modelos

4.2 Dados Observacionais

4.2.1 Rede de observações locais

Portugal é um país pequeno, com uma topografia complexa e com aproximadamente 89 000 km². No entanto, a cobertura espacial da rede de observações é bastante escassa quer espacial quer temporalmente, apresentando muitas falhas de qualidade nos dados. No período de simulação em estudo, os dados disponíveis do IM compreendem 6 estações com dados de 3 horas com valores de intensidade do vento, temperatura e humidade, para todo o continente, e 42 estações com dados diários. Destas só 32 continham falhas de registos menores que 25% para temperatura, e 16 para o vento, pelo que só estas foram consideradas. Os dados diários contêm dados de temperatura máxima e mínima, precipitação acumulada e intensidade média diária do vento. Os dados disponíveis do INAG compreendem 308 estações com dados diários de precipitação, com uma taxa de registos omissos menores que 5%.

Nas figuras 1b) e 1c) estão representadas a distribuição de estações consideradas para temperatura, vento e precipitação.

4.2.2 Grelha de Observações E-OBS

A grelha observacional ENSEMBLES para a Europa (E-OBS) [Haylock *et al.* 2008, Klok and Klein Tank 2009], compreende valores diários de precipitação e temperatura interpolados para uma grelha com resolução espacial de 0.25° (E-OBS0.25). Convém referir que, em certas regiões da grelha, a informação de observações é bastante escassa e os resultados aparentes provenientes da interpolação para uma alta resolução são bastante suavizados, nomeadamente no que diz respeito aos campos de temperatura e precipitação. Esta grelha em Portugal foi baseada em somente 26 estações.

5. Resultados

5.1 Validação da Simulação Regional WRF

Os resultados da simulação do modelo WRF são comparados com as estações locais de modo a abordar vários aspectos. Em primeiro lugar, avaliar a capacidade de reprodução das propriedades médias do clima local e a sua variabilidade e, em segundo, caracterizar o valor e a quantidade de informação que é acrescentada pelo downscaling WRF relativamente à reanálise ERA-Interim. Estes dois aspectos fornecem a base para determinar a qualidade do modelo na descrição do clima de Portugal, a eventual proposta de uma climatologia de alta resolução e, finalmente, permitem o futuro estudo do impacto das alterações climáticas.

Os resultados da ERA-Interim foi interpolada para uma malha regular de resolução espacial de 0.7°. No caso dos modelos WRF (9km e 27km) as temperaturas máximas e mínimas diárias são calculadas a partir dos dados horários e de dados de 3 horas para a ERA-Interim. A precipitação acumulada é calculada nos modelos a partir da informação horária do WRF e tri-horária da ERA-Interim das 9 às 9 UTC em concordância com as estações Portuguesas.

Devido à diferença de altitudes entre as co-localizações nos modelos e das estações, efectuou-se uma correcção altimétrica nos dados de temperatura máxima e mínima utilizando um gradiente vertical de temperatura de 6.5 °C/km. Nenhuma correcção topográfica foi realizada para a precipitação, pois o processo é bastante mais complicado devido à complexa dependência com a topografia, humidade e outras variáveis locais (Smith and Barstad, 2004).

A avaliação da simulação é baseada no cálculo de algumas quantidades estatísticas tais como o viés (BIAS), o viés percentual (BIAS%), o erro médio absoluto (MAE), o erro médio absoluto percentual (MAPE), o erro médio quadrático (RMSE), os coeficientes de correlação e desvios padrão, entre os resultados dos modelos (WRF e ERA-Interim) e as observações, de acordo com:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_k - o_k \quad (1)$$

$$Bias\% = \frac{BIAS}{\sum_{k=1}^N o_k} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |p_k - o_k| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{MAE}{\sum_{k=1}^N o_k} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (p_k - o_k)^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{k=1}^N (o_k - \bar{o})(p_k - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (o_k - \bar{o})^2 \sum_{k=1}^N (p_k - \bar{p})^2}} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (p_k - \bar{p})^2} \quad (7)$$

Onde N é o número total de dias previstos/observados.

Estas medidas são calculadas para as temperaturas máxima e mínima, precipitação acima de 0.1 mm e vento, utilizando o método do ponto mais próximo na grelha do modelo ao ponto de observação (local ou grelha). Quando as medidas estatísticas de referem globalmente a Portugal ou a regiões específicas os pontos são considerados em conjunto (pooling together) para cada área espacial. As quantidades estatísticas foram calculadas para diversos intervalos temporais: diário, 5 dias, mensais, sazonais e anuais. De modo a permitir uma avaliação regional Portugal foi dividido em 6 regiões (Figura 1b). A caracterização dos eventos extremos é efectuada através da análise de histogramas, percentis e pelo cálculo de um conjunto de índices climáticos: *hot days*, *summer days*, *frost days* e *tropical nights*.

5.1.1 Avaliação Global

A climatologia dos 20 anos de temperatura máxima diária (Fig.2-a), 2-b) e 2-c)) mostra um claro gradiente latitudinal, o efeito da costa e da topografia. O gradiente Norte-Sul é identificado em todos os modelos, mas o efeito da orografia na espacialização de Tmax só começa a ter representatividade no WRF 27km sendo bastante proeminente no WRF 9k onde o campo de Tmax é por essa razão bastante heterogéneo. Estas características estão presentes tanto na grelha E-OBS como nas estações locais, mesmo com uma escassa distribuição de observações.

Os valores de temperatura máxima variam entre [13,25] °C nas observações locais, [15,24] °C na grelha e [16,23] °C na reanálise da ERA-Interim(ERA-I a partir de agora). Nas grelhas de alta resolução, estas variam entre [16, 24] °C para WRF 27km e [15, 25] °C no WRF 9km.

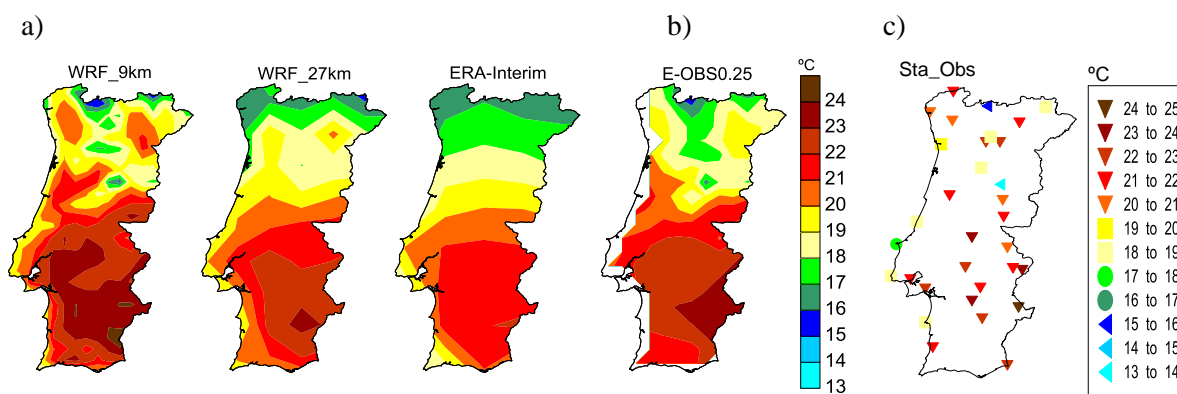


Fig. 2 – Temperatura máxima diária média para 20 anos de simulação : a) WRF9km, WRF 27km e ERA-Interim; b) grelha de observações E-OBS, e c) observações locais.

Analisando a distribuição para média dos vintes anos diários de Tmin (Fig.3), esta denota um padrão menos heterogéneo que Tmax, mas são de salientar ainda assim, algumas características importantes. À semelhança de Tmax, Tmin apresenta também um gradiente latitudinal, com temperaturas mais elevadas a Sul e mais baixas a Norte e um gradiente longitudinal a Norte do território característica de um clima continental (Soares *et al.*, 2011).

A distribuição espacial do gradiente Oeste-Este dada pelas observações tem uma boa representação no modelo WRF. Refere-se ainda que o efeito da costa é também bem captado pela simulação de alta resolução, efeito esse que parece ter pouca representatividade no modelo de forçamento.

Os valores de Tmin variam entre [5,14] °C nas observações locais e entre [6,13] °C na grelha E-OBS, no caso da ERA-I estes variam entre [6,17] °C, e entre [6,14] °C e [5, 14] °C no WRF 27km e WRF 9km respectivamente.

É de notar a semelhança entre a ERA-I e a grelha E-OBS quanto à sobrestimação de Tmin em relação às observações locais, especialmente no Centro e Sul de Portugal. Tal facto pode influenciar os resultados da validação dos modelos com a grelha E-OBS.

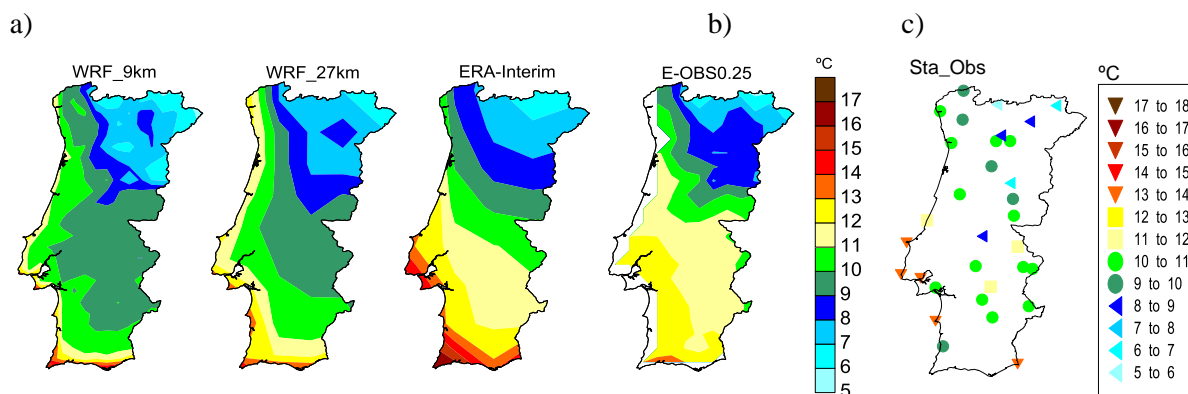


Fig. 3 – Temperatura mínima diária média para 20 anos de simulação : a) WRF9km, WRF 27km e ERA-Interim; b) grelha de observações E-OBS, e c) observações locais.

Observe-se a Fig. 4 quanto à distribuição dos viés para Tmax. Pode-se verificar que para o WRF 9km os viés não excedem na sua maioria 1 °C de módulo, estando estes maioritariamente entre [0,1] °C. Contudo, existem 3 pontos que excedem 1 °C, sendo um deles o correspondente à estação do Cabo Carvoeiro junto à costa. Para o WRF 27km encontram-se viés na sua maioria entre [-1,0] °C, sendo que o ponto correspondente à estação do Cabo Carvoeiro tem um viés acima dos 2 °C. Para o domínio de 27km são ainda de salientar 10 estações com com viés entre [-2,-1] °C salientando uma subestimação de Tmax em relação às observações. Todavia, é de notar a capacidade do modelo WRF em representar Tmax, mesmo a 27km.

Já ERA-I, indica o maior intervalo de viés, com valores na sua maioria entre $[-3,0]$ °C o que demonstra uma clara subestimação de Tmax para Portugal, excepto em algumas regiões costeiras no Centro e Sul. De notar que o viés negativo da reanálise é parcialmente corrigido na simulação de alta resolução, em especial nas regiões de topografia acentuada e em algumas zonas junto à costa. Indicando que os processos de pequena escala resolvidos nos modelos regionais desempenham um papel importante na redução do viés do modelo de forçamento (Barstad *et al.*, 2004).

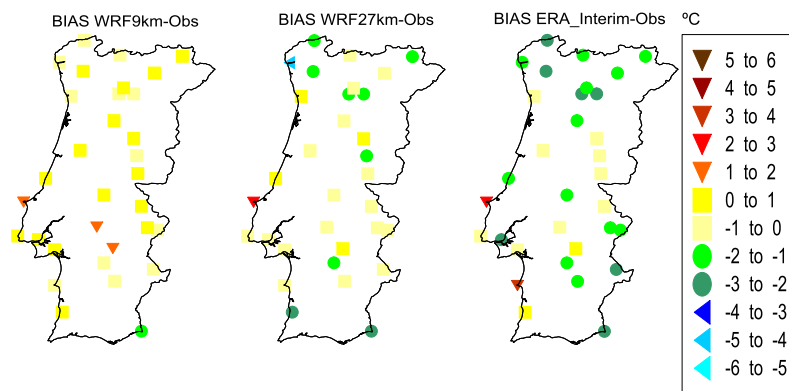


Fig. 4 – Viés de Tmax diária entre modelos e observações locais

Analisando o viés em relação à grelha E-OBS (Fig.5), a sua distribuição difere pouco da comparação com as estações. O WRF 9km apresenta, na generalidade, um viés entre $[0,1]$ °C. Na costa, em áreas muito limitadas, a norte do Tejo e no cabo de Sagres, observam-se viés entre $[-2,0]$. Para a simulação 27km, a distribuição do viés encontra-se num intervalo entre $[-1,1]$ °C, exceptuando no Algarve onde se verifica uma subestimação, possivelmente associado à sobrestimação da temperatura nas zonas costeiras, por parte da grelha. A comparação com a ERA-I, mostra um viés semelhante ao observado na análise com as observações locais. Numa avaliação global, verifica-se um viés maioritariamente entre $[-1,0]$ °C com algumas zonas entre $[-2,-1]$ °C. Em particular, o sudoeste algarvio apresenta um viés negativo que excede os 3°C.

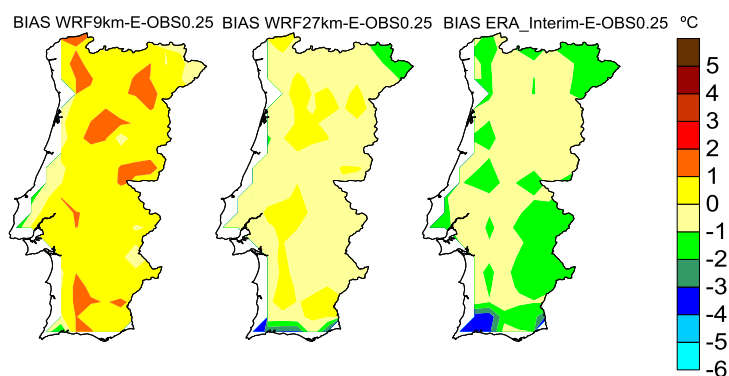


Fig. 5 – Viés de Tmax diária entre modelos e grelha E-OBS

A Fig.6 mostra-nos o viés dos 20 anos de simulação relativamente às estações locais, para a temperatura mínima. A distribuição dos valores de viés é semelhante no caso dos dois domínios do WRF. Ambas com dois intervalos dominantes de valores entre $[-2,0]$ °C e $[0,1]$ °C, e apresentando valores extremos de -3 °C na estação Cabo Carvoeiro, e 3 °C na estação de Alvega, cuja localização é próxima do vale do rio Tejo. A 27 km verifica-se ainda um viés de -4 °C na estação de Portalegre. Estes valores são notoriamente mais elevados do que o viés de Tmax, o que é concordante com a grande maioria dos estudos. Os modelos têm dificuldades em representar correctamente as temperaturas mínimas observadas, o que se pode dever a falhas na parametrização da dinâmica e física da camada limite nocturna (Zhang *et al.*, 2009). Os valores mais elevados de viés de Tmin no Cabo Carvoeiro parecem estar relacionados com a acentuada irregularidade da costa. Em Alvega o modelo WRF em ambas as resoluções parece não conseguir melhorar substancialmente a representação de Tmin, quando comparada com o forçamento de larga-escala. Ainda assim, o modelo WRF demonstra a boa capacidade de simulação para Tmin.

Ao analisar a distribuição de Tmin da ERA-I, esta mostra claramente uma sobrestimação para boa parte do território em relação às observações, com viés entre $[0,2]$ °C, e extremos de -4 °C nas Penhas Douradas, -3 °C em Portalegre - ambas duas zonas de montanha - , 3 °C na estação da Zambujeira junto à costa e 4 °C na estação de Alvega ($+1$ °C em relação ao WRF).

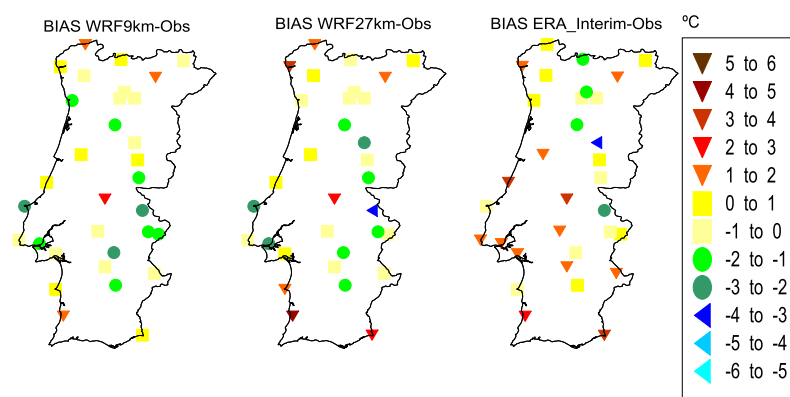


Fig. 6 – Viés de Tmin diária entre modelos e observações locais

A comparação entre os modelos e a grelha de observação (Fig.7) mostra um aparente melhor desempenho da ERA-Interim, e no caso do WRF uma diminuição dos valores mais elevados de viés. De um modo geral, observa-se um viés negativo dos domínios WRF para todo Centro e Sul do território, com valores entre $[-2,-1]$ °C, e uma ligeira sobrestimação a Norte, com um viés entre $[0,1]$ °C. Em relação à ERA-I, o viés na sua maioria situa-se entre $[-1,0]$ °C, com valores máximos de 4 °C no sudoeste. Esta melhoria aparente da ERA-I está relacionada com o facto de esta apresentar uma sobrestimação de Tmin quando comparada com as observações locais, muito semelhante à própria grelha E-OBS (ver Fig. 3).

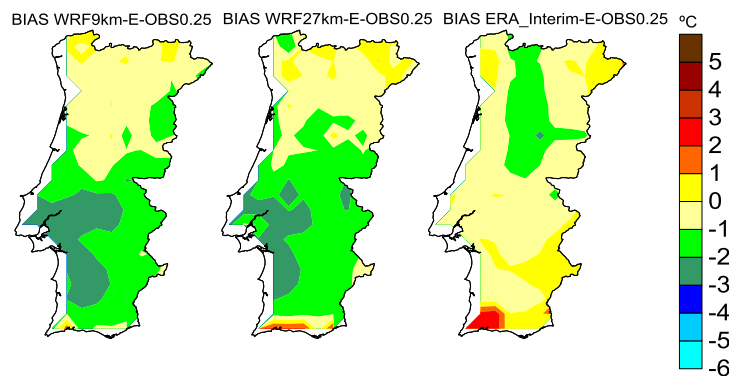


Fig. 7 – Viés de Tmin diária entre modelos e grelha E-OBS

A distribuição de precipitação (Fig.8) mostra um gradiente Norte-Sul e uma forte relação com a topografia. Os valores mais elevados encontram-se a Noroeste estando associados à passagem de frentes em Portugal, e intensificação pelo efeito da topografia. Ainda a Norte do território, pode-se observar um gradiente longitudinal compreendendo valores entre 2200 e 400 mm (Oeste-Este). O contraste entre um Noroeste mais húmido e um Nordeste mais seco é bastante bem caracterizado nas duas grelhas WRF, se bem que a 27km o seja de uma maneira mais suavizada. Embora na ERA-I o gradiente noroeste-nordeste seja visível, o efeito topográfico é bastante reduzido devido ao suavizamento da topografia, o que diminui a variabilidade espacial, não representando os valores máximos e mínimos de precipitação, presentes no modelo WRF e nas observações. Outra característica importante é a presença das montanhas a Sul, estas não são muito elevadas mas afectam a precipitação da região que atinge os 800 mm. Este sinal é bem visível no WRF 9km em concordância com as observações locais.

A heterogeneidade espacial no campo da precipitação do modelo WRF está fortemente associada à melhor representação da intensificação orográfica da precipitação quando as frentes evoluem sobre o território português. De facto, a alta resolução utilizada está em grande medida na origem desta melhoria, por um lado, devido a uma orografia mais detalhada e realista, e por outro, pela maior adequação das parametrizações (Leung *et al.* 2003b, Zhang *et al.* 2009).

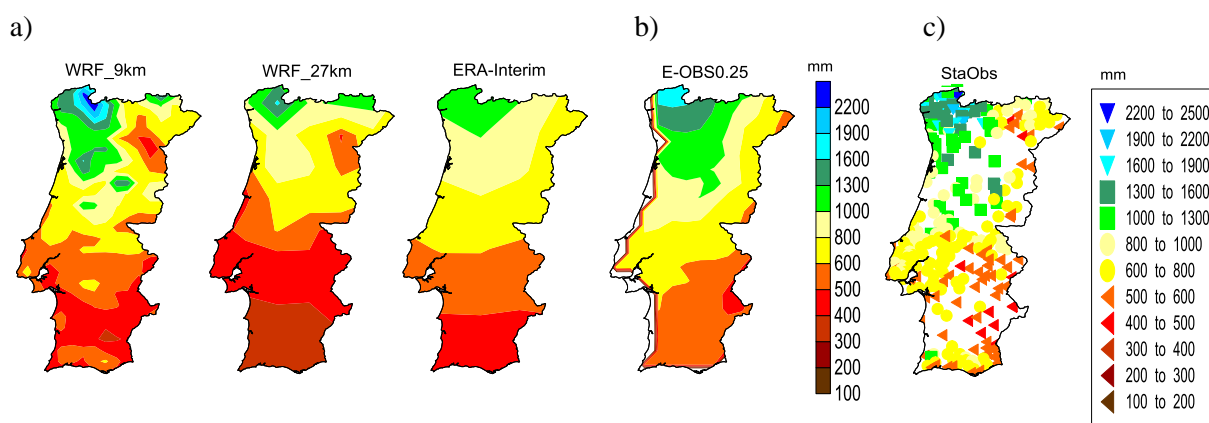


Fig. 8 - Precipitação anual acumulada média : a) WRF 9km, WRF 27km e ERA-I; b) grelha E-OBS e c) observações locais IM-INAG;

As Figs. 9 e 10, mostram os viés normalizados para o período de simulação da precipitação diária acumulada com as estações e com a grelha E-OBS, respectivamente.

De um modo geral, pode verificar-se que o WRF 9km apresenta uma boa representação da precipitação, com uma tendência para subavaliar a precipitação em cerca de 10% a 30%, especialmente nas zonas montanhosas do Sul, e uma sobreavaliação em cerca de 10% a 20 % nas regiões mais secas no Nordeste. Na cadeia montanhosa da Peneda-e-Gerês, onde os maiores valores de precipitação são observados, o modelo WRF 9km sobrestima a precipitação em mais de 20%. O WRF 9km possui viés relativamente mais baixos que o WRF 27 km, porém a ERA-I mostra uma surpreendente capacidade de simular a precipitação diária, sendo mesmo melhor que os resultados do WRF 27km.

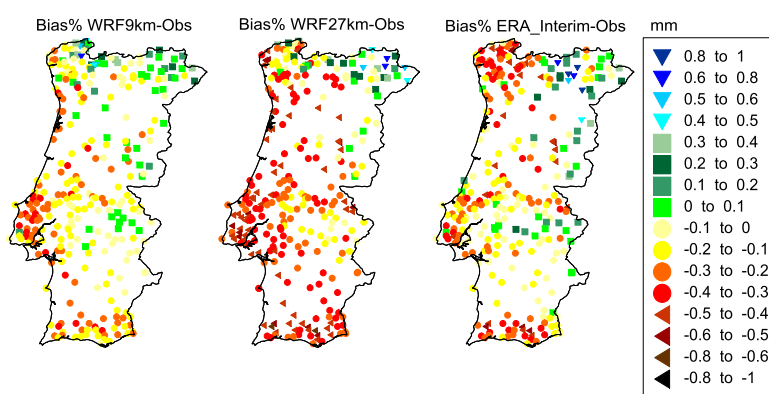


Fig. 9 – Viés normalizados de precipitação diária acumulada entre modelos e observações

Ao analisar a Fig.10 verifica-se para o WRF 9km uma subestimação predominante nas regiões Centro e Sul com viés entre $[0,20]$ %. A Noroeste, nas zonas de elevada precipitação, tem-se uma sobrestimação entre $[10,40]$ %, nas zonas a Nordeste subestimação entre $[-20, -40]$ % e zonas onde o modelo sobrestima a precipitação entre $[0,20]$ %. No WRF 27km verifica-se uma melhoria aparente em relação aos viés, que rondam agora entre $[10,20]$ % para a maioria do Centro e Sul. A Noroeste variam entre -10% e 10% e no Nordeste entre $[10,20]$ %. Na comparação com ERA-I, esta mostra toda a região Oeste de Norte a Sul com uma subestimação entre $[-10,-40]$ % e uma sobrestimação a Este em cerca de 10% . Quando comparados estes viés com a avaliação com as observações locais (Fig.9) verifica-se uma diferença assinalável nos três casos.

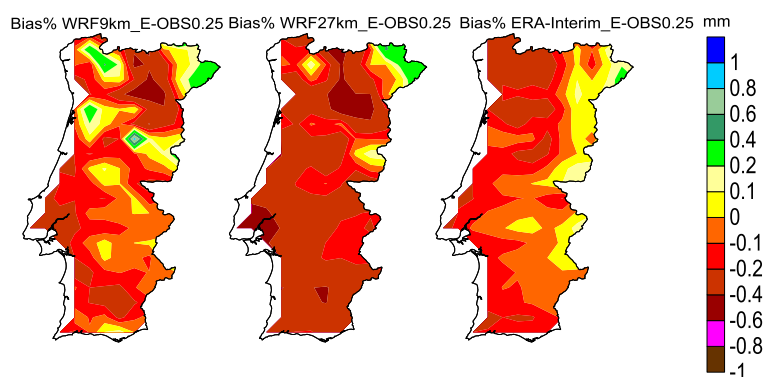


Fig. 10 – Viés normalizados de precipitação diária acumulada entre modelos e grelha E-OBS

A Fig.11 mostra a distribuição da intensidade média do vento (vento) diário para os 20 anos dos modelos WRF e ERA-I e das estações. Verifica-se uma sobrestimação no caso do WRF na intensidade do vento em relação às observações. Já no caso da ERA-I, os valores do vento são mais próximos ao observado, apesar de uma ligeira sobrestimação. O modelo WRF mostra uma heterogeneidade espacial - que pode estar associada à topografia do terreno - que vai de encontro à distribuição da intensidade do vento nas observações. Na generalidade, as observações mostram ventos diários médios entre um mínimo de 1.3 m/s e um máximo de 5.3 m/s com maior intensidade a Noroeste, Centro Oeste e Sudeste; a ERA-I apresenta valores entre [2.8,6.3] m/s com os valores mais elevados ao longo de toda a costa; e o WRF com valores entre [3.3,6,8] m/s também com valores elevados ao longo de toda a costa e em algumas zonas do interior do Norte e Sul.

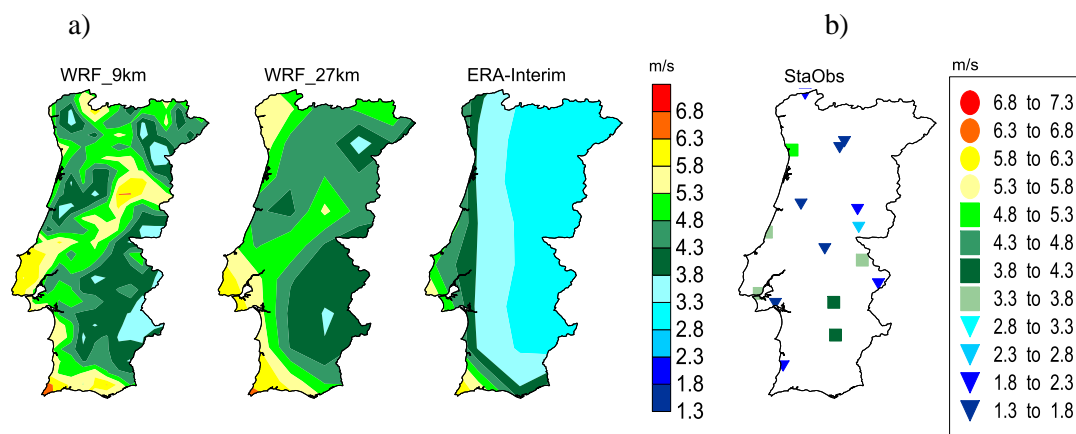


Figura 11 – Vento médio diário : a) WRF 9km,WRF 27km e ERA-I; b) Observações locais (IM).

Visualizando a magnitude e distribuição dos viés representada na Fig.12, observa-se que toda a costa Norte e Centro, bem como o Sudeste é bastante bem representado pelo modelo WRF. Com viés entre [0.5, 1.5] m/s na costa a Norte e Centro e [-0.5,0] m/s no interior Sudeste para o domínio de 9km. Para a grelha de 27km, tem-se viés entre [0,1.5] m/s e [-0.5,0] m/s na costa a Norte e Centro e interior Sudeste respectivamente. No caso da ERA-I e para as mesmas regiões, observam-se viés entre [-1.5,2] m/s e [-1.5,1] m/s, indicando que o modelo WRF simula relativamente melhor a resposta do vento à topografia da costa a Norte e Centro. Em relação ao Sudeste, os valores dizem respeito à estação de Évora e Beja.

De um modo geral, tem-se uma melhor representação do vento junto à costa por parte do WRF, o que suporta a melhor performance dos RCMs para a simulação de circulações de brisa e de escoamentos que tenham uma forte influência da topografia da costa (Winterfeldt and Weisse, 2009).

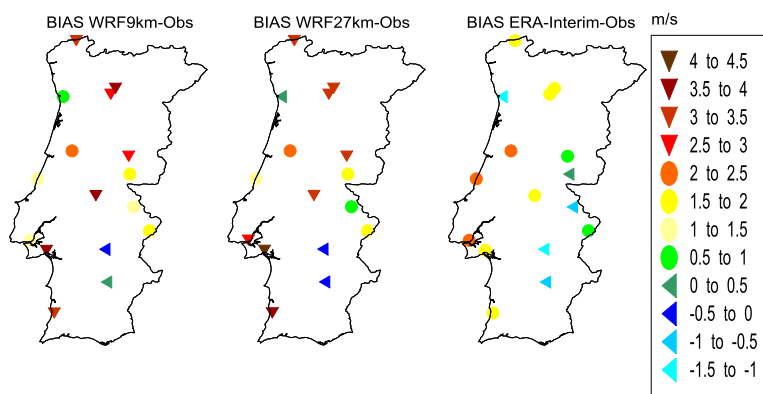


Fig. 12 – Viés de vento médio diário entre modelos e observações locais

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentadas as estatísticas globais em relação às estações e grelha respectivamente, para os três domínios realçando a negrito os melhores valores.

Para as correlações da Tabela 1, verifica-se que, para o intervalo de um dia os valores são 0.93 para o WRF 9km e 0.92 para WRF 27km e ERA-I. Observa-se ainda que os coeficientes de correlação aumentam com o aumento do intervalo de agregação, atingindo correlações mensais de 0.98, 0.97 e 0.96 para WRF 9km, WRF 27km e ERA-I respectivamente. O viés (BIAS na Tabela) global para WRF 9km denota um valor bastante pequeno de 0.1 °C em Tmax para todos os intervalos e -0.2 °C em Tmin para WRF 27km. O comportamento de RMSE e MAE é o de diminuição com o intervalo de agregação, onde o WRF 9km obtém os melhores valores em Tmax e Tmin. Para todas as medidas de erro, a ERA-I é cerca de 0.5 °C pior. Em relação ao desvio padrão, verifica-se que WRF 9km sobrestima a variabilidade de Tmax em cerca de 3% em todos os intervalos, mas para Tmin, este mostra uma variabilidade igual às observações, a cinco dias e a um mês, o que indica que o WRF 9km representa de uma forma assaz impressionante a variabilidade a estas escalas temporais. Em simultâneo tem-se o mesmo desempenho do domínio 27km para Tmin à escala mensal. A ERA-I subestima e sobrestima Tmax e Tmin, respectivamente, em todos intervalos temporais, ficando aquém do desempenho do modelo WRF.

Tabela 1 – Erros globais diários a mensais (Modelos_v_StaObs) de Tmax e Tmin

Model - Obs	Time	CORR		BIAS (°C)		RMSE (°C)		MAE (°C)		Norm Stdev	
		Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
WRF9km	Daily	0.93	0.90	0.1	-0.4	2.8	2.4	2.1	1.9	1.03	0.98
	5-days	0.97	0.94	0.1	-0.4	1.7	1.8	1.3	1.4	1.03	1.00
	Monthly	0.98	0.95	0.1	-0.4	1.3	1.5	1.0	1.2	1.03	1.00
WRF27km	Daily	0.92	0.87	-0.8	-0.2	3.1	2.8	2.3	2.1	1.01	0.97
	5-days	0.96	0.90	-0.8	-0.2	2.1	2.2	1.6	1.7	1.02	0.98
	Monthly	0.97	0.92	-0.8	-0.2	1.8	1.9	1.3	1.5	1.03	1.00
ERA-Interim	Daily	0.92	0.89	-1.1	0.5	3.1	2.7	2.3	2.0	0.95	1.07
	5-days	0.95	0.92	-1.1	0.5	2.4	2.2	1.8	1.6	0.96	1.10
	Monthly	0.96	0.94	-1.1	0.5	2.1	1.9	1.6	1.5	0.96	1.13

À semelhança do que se verificou na análise espacial do viés dos modelos com a grelha E-OBS (Figs 5 e 7), observa-se pela Tabela 2 uma aparente melhor descrição por parte da ERA-I e WRF 27km para Tmin. Além de Tmin e apesar de não se evidenciar de igual forma, as estatísticas também demonstram que em Tmax a ERA-I é melhor, nomeadamente nas correlações onde se observam valores de 0.98 e 0.99 a um e cinco dias, respectivamente; onde o WRF 9km obteve valores de 0.97 e 0.98. Para Tmin, a ERA-I detém as melhores correlações para todos os intervalos, superando o modelo WRF, nas duas resoluções, por pouco. Analisando o viés, o WRF 2km é o que demonstra valores mais baixos para Tmax, com valores de -0.3°C em todos os intervalos temporais, seguido do WRF 9km com 0.5 °C, e por fim a ERA com -1.0 °C, apesar desta última ter as melhores correlações. Para Tmin a reanálise tem o viés mais baixo, -0.3 °C. O RMSE e MAE diminuem, como esperado, com o intervalo de agregação. Todos os modelos têm valores bastante próximos para Tmax, tendo valores iguais de RMSE e MAE, para um mês e cinco dias, respectivamente. Para a variável Tmin, a ERA-I tem os menores valores de RMSE e MAE. Quando se analisam os resultados do desvio padrão relativo (Norm_Stdev na Tabela) verifica-se que é em Tmin que o modelo WRF representa com muito bem a variabilidade desta em todos os intervalos, e sobreavalia em cerca de 1 % para Tmax; para o modelo de forçamento passa-se o oposto.

Tabela 2 – Erros globais diários a mensais (Modelos_v_E-OBS) de Tmax e Tmin

Model - Obs	Time	CORR		BIAS (°C)		RMSE (°C)		MAE (°C)		Norm Stdev	
		Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
WRF9km	Daily	0.97	0.94	0.5	-1.3	2.0	2.2	1.6	1.8	1.1	1.0
	5-days	0.98	0.96	0.5	-1.3	1.6	1.9	1.2	1.5	1.1	1.0
	Monthly	0.99	0.97	0.5	-1.3	1.3	1.7	1.0	1.4	1.1	1.0
WRF27km	Daily	0.96	0.94	-0.3	-1.1	2.1	2.2	1.6	1.7	1.1	1.0
	5-days	0.98	0.96	-0.3	-1.1	1.6	1.8	1.2	1.5	1.1	1.0
	Monthly	0.99	0.96	-0.3	-1.1	1.3	1.7	1.0	1.3	1.1	1.0
ERA-Interim	Daily	0.98	0.95	-1.0	-0.3	1.7	1.8	1.4	1.4	1.0	1.1
	5-days	0.99	0.97	-1.0	-0.3	1.5	1.5	1.2	1.1	1.0	1.1
	Monthly	0.99	0.98	-1.0	-0.3	1.3	1.3	1.1	1.0	1.0	1.1

Em relação as observações (Tabela 3) para a precipitação diária acumulada, tem-se correlações de 0.72 a 0.89 para WRF 9km e 0.72 a 0.87 na ERA-I a um dia e a um mês respectivamente, onde domínio de 27km fica aquém da reanálise em todos os domínios temporais. É de referir ainda, que as quantidades estatísticas apresentadas não são de todo únicas e conclusivas numa avaliação de modelos regionais, especialmente a várias resoluções espaciais, e em campos tão variáveis e complexos como a precipitação. Ainda assim, é de referir a capacidade do WRF 9km em descrever esta variável nas várias escalas temporais. Observando o viés distingue-se a diminuição dos valores com o período de agregação, tendo como valores para o viés -0.2, -1.1 e -6.5 mm para WRF 9km e -0.5, -2.3 e -13.6 mm para ERA-I a um dia, 5-dias e um mês respectivamente. WRF 9km e ERA-I apresentam valores iguais de MAE para um dia, sendo que para os outros intervalos o WRF 9km regista uma ligeira melhoria. A Tabela ilustra também que o WRF 9km apresenta valores menores de MAPE, 71.8 % a 33.5 %. Analogamente a Tmin e Tmax, as escalas sinópticas (5-dias) têm melhor representação no modelo WRF 9km com uma sobrestimação de 49.9 % em comparação com os 51.1 % da ERA.

Tabela 3 – Erros globais diários a mensais (Modelos_v_StaObs) precipitação

Model - Obs	Time						
		Corr	RMSE (mm)	Bias (mm)	Bias %	MAE (mm)	MAPE (%)
WRF9km	Daily	0.72	5.3	-0.2	-9.8%	1.7	71.8%
	5-days	0.84	13.6	-1.1	-9.5%	6.0	49.9%
	Monthly	0.89	43.4	-6.5	-8.9%	24.4	33.5%
WRF27km	Daily	0.67	5.8	-0.6	-25.3%	1.9	78.1%
	5-days	0.77	15.8	-3.0	-25.1%	7.1	59.4%
	Monthly	0.84	53.4	-17.9	-24.6%	31.6	43.4%
ERA-Interim	Daily	0.72	5.1	-0.5	-19.6%	1.7	70.7%
	5-days	0.83	14.5	-2.3	-19.3%	6.2	51.1%
	Monthly	0.87	51.3	-13.6	-18.6%	27.0	37.1%

Na Tabela 4 pode-se observar os erros globais entre os resultados de precipitação dos modelos e a grelha regular de observação. Tal como anteriormente observado, a ERA-I e o WRF27km, genericamente, apresentam, os melhores resultados quando comparados com a grelha. Porém, nos valores de viés e viés % o WRF 9km possui os valores mais baixos, -0.2, -0.8 e -4.8 mm, e a ERA-I valores de -0.2, -1.2 e -7.4 para um dia, 5-dias e mensal, respectivamente. No MAE, o WRF 9km e WRF 27km têm valores muito próximos, embora o primeiro registe melhor desempenho. Os valores de MAE, para um dia, são de 1.6, 1.7 e 1.3 para o WRF 9km, WRF 27km e ERA-I, respectivamente.

De um modo geral, a comparação com a grelha de precipitação, revela uma melhor performance da ERA-Interim e do WRF27 km, relativamente à comparação com as observações pontuais.

Tabela 4 – Erros globais diários a mensais (Modelos_v_ E-OBS) de precipitação

Model - Obs	Time						
		Corr	RMSE (mm)	Bias (mm)	Bias %	MAE (mm)	MAPE (%)
WRF9km	Daily	0.70	4.60	-0.2	-7.3%	1.6	75.1%
	5-days	0.84	11.55	-0.8	-7.3%	5.3	48.8%
	Monthly	0.87	39.26	-4.8	-7.3%	22.2	33.6%
WRF27km	Daily	0.66	4.82	-0.5	-21.3%	1.7	79.8%
	5-days	0.79	12.78	-2.3	-21.3%	6.2	57.1%
	Monthly	0.86	42.71	-14.0	-21.3%	26.3	39.9%
ERA-Interim	Daily	0.78	3.51	-0.2	-11.3%	1.3	60.4%
	5-days	0.90	9.31	-1.2	-11.3%	4.3	39.8%
	Monthly	0.93	32.67	-7.4	-11.3%	18.2	27.5%

Na distribuição espacial do viés analisada na Fig.12, observou-se que os modelos têm maior qualidade em localizações junto à costa, e menor em localizações de vales ou montanhas. Analise-se agora o comportamento global dos modelos na Tabela 5.

As características mais importantes a salientar da leitura dos resultados para a intensidade do vento são: a correlação a um dia é maior no modelo WRF de alta resolução, com valor igual a 0.49, enquanto que a 27km é 0.44 e a ERA-I 0.46; para o viés mostram-se valores de 2.2 m/s para o modelo WRF e 1.0 para ERA-I em todos os intervalos temporais; por último, o desvio padrão apresenta uma sobrestimação e subestimação em 1 % para WRF 9km, a um e cinco dias, demonstrando a capacidade do modelo em simular a variabilidade da intensidade do vento a estas escalas temporais.

Tabela 5 – Erros globais diários a mensais (Modelos_v_StaObs) de vento

Model - Obs	Time						
		Corr	RMSE (m/s)	Bias (m/s)	Norm_Stdev	MAE (m/s)	MAPE (%)
WRF9km	Daily	0.49	2.8	2.2	1.1	2.3	88%
	5-days	0.40	2.6	2.2	0.9	2.2	86%
	Monthly	0.20	2.5	2.2	0.7	2.2	84%
WRF27km	Daily	0.44	3.0	2.2	1.2	2.4	91%
	5-days	0.33	2.8	2.2	1.1	2.3	88%
	Monthly	0.11	2.7	2.2	0.9	2.3	86%
ERA-Interim	Daily	0.46	2.1	1.0	1.1	1.6	62%
	5-days	0.47	1.8	1.0	1.0	1.5	57%
	Monthly	0.36	1.6	1.0	0.9	1.4	55%

Numa visão global, focada na comparação com as estações pontuais, os resultados das simulações WRF mostram um bom desempenho na representação dos campos médios de Tmax e Tmin para Portugal continental. O aumento da resolução leva a uma melhoria da distribuição temporal e espacial de Tmax e Tmin, reduzindo para tal os erros inerentes ao modelo de forçamento e de menor resolução. O modelo WRF 9km mostra também um bom desempenho na caracterização da precipitação, mostrando uma melhoria em relação à reanálise mas, mais importante, é a sua capacidade de demonstrar as heterogeneidades espaciais intrínsecas ao campo médio da precipitação.

A comparação com a grelha regular revela-nos uma realidade um tanto diferente, em que o WRF genericamente não apresenta melhorias significativas em relação à ERA-I.

A avaliação mostra ainda o razoável desempenho do modelo WRF na simulação da intensidade do vento aos 10 m, especialmente na região costeira ao Centro e Norte. Os estudos do desempenho de RCMs na simulação de vento à superfície (Winterfeldt and Weisse, 2009; Barstad *et al.*, 2009; Sotillo *et al.*, 2009) concluem que fenómenos de mesoscala tais como mesociclones, frentes, brisas marítimas-terrestres ou escoamentos induzidos pela orografia do terreno tendem a aumentar o valor acrescentado pelos RCMs. Para a simulação de vento estes têm denotado valor acrescentado em áreas de região costeira com orografia complexa, como por exemplo no Mediterrâneo (Sotillo *et al.*, 2009) e no Canal Inglês (Winterfeldt and Weisse, 2009). Por outro lado Barstad *et al.* (2009) concluiu que para o interior do território o modelo tem pior desempenho, atribuindo para tal a falta de representação de processos de pequena escala que se sobrepõem ao efeito de topografia, apesar da boa representação deste último por parte do modelo.

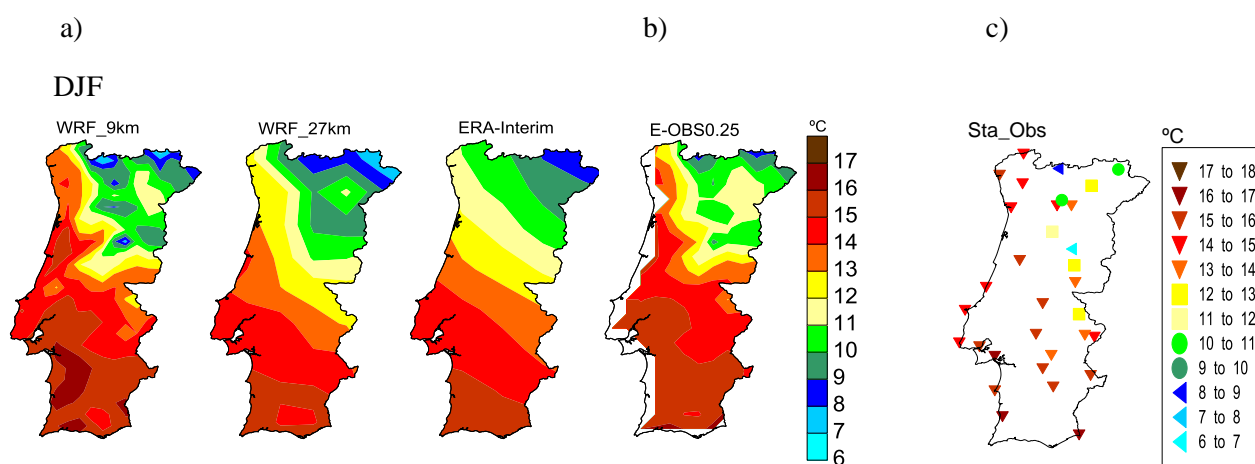
Estes estudos a nível europeu na avaliação da intensidade do vento à superfície foram efectuados com um número considerável de estações pontuais, o que não é o caso de Portugal Continental que conta apenas com 16 estações de observação. Por esta razão a avaliação da intensidade do vento foi apenas efectuada somente numa visão global, não sendo apresentado o estudo a nível sazonal e regional.

Após esta avaliação global dos modelos, falta ainda realizar uma análise que leve em conta os ciclos sazonais e eventos extremos dos campos em análise - à excepção do vento - . Esta análise detalhada será feita em domínios regionais de forma a mostrar toda a potencialidade e utilidade do modelo WRF como possível base de dados climatológica.

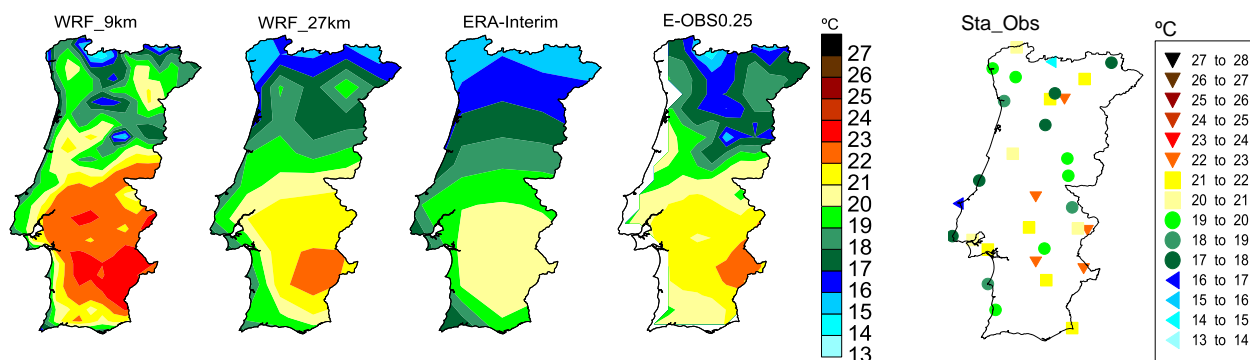
5.1.2 Temperatura máxima

5.1.2.1 Climatologia sazonal

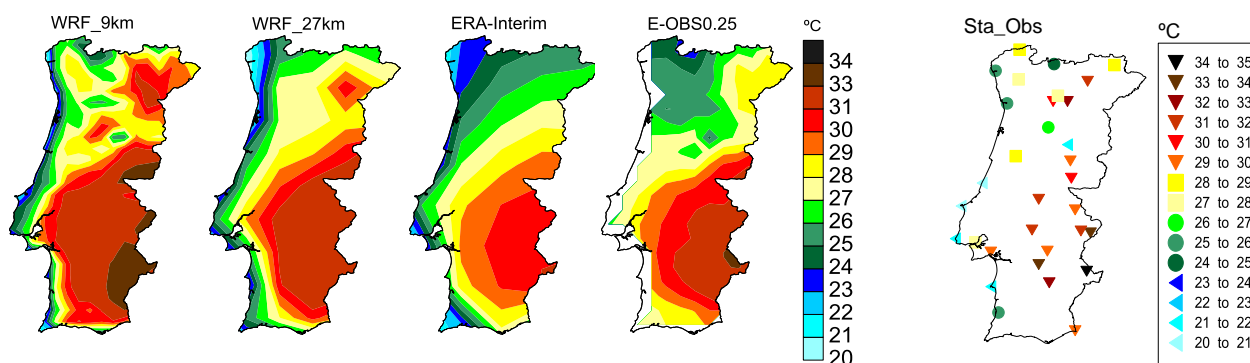
Na Fig. 13, estão ilustradas as médias sazonais dos vinte anos para temperatura máxima. No Inverno, Primavera e Outono os mínimos de temperatura estão associados aos maciços montanhosos, enquanto que no Verão estes observam-se junto à costa, associados ao efeito de brisa marítima. À semelhança das observações, todos os modelos representam o gradiente Norte-Sul de Tmax com temperaturas mais baixas a Norte e mais elevadas a Sul. Uma vez mais, o WRF 9km representa bem a heterogeneidade da distribuição espacial do campo médio em todas as estações do ano, assim como o efeito da costa na Primavera e no Verão.



MAM



JJA



SON

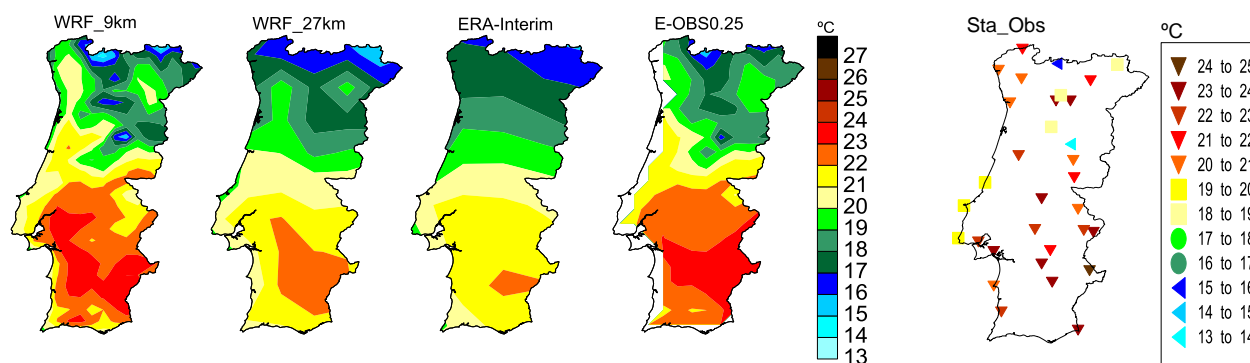


Fig. 13 – Temperatura máxima, média sazonal de 20 anos de simulação: a) modelos; b) Observações grelha; c) Observações locais para as quatro estações: Inverno (DJF), Primavera (MAM), Verão (JJA) e Outono (SON).

No gráfico das correlações da Fig. 14, verificam-se os maiores valores para o WRF 9km à excepção do Inverno, ainda assim, com valores muito próximos da ERA-I. A distribuição sazonal de viés mostra uma correcção parcial do viés negativo do modelo de forçamento no WRF. Talvez o viés negativo esteja relacionado com os dados de forçamento e não com os efeitos regionais do modelo nestas duas estações (Zhang *et al.*, 2009). De referir ainda que a elevada correlação e baixo viés durante o Verão no modelo WRF, quando comparado com a ERA-I, indica a boa capacidade do modelo WRF em representar as circulações térmicas dominantes desta estação. Tal desempenho é denotado em todas as restantes quantidades estatísticas calculadas, MAE e MAPE que são mais baixos no WRF.

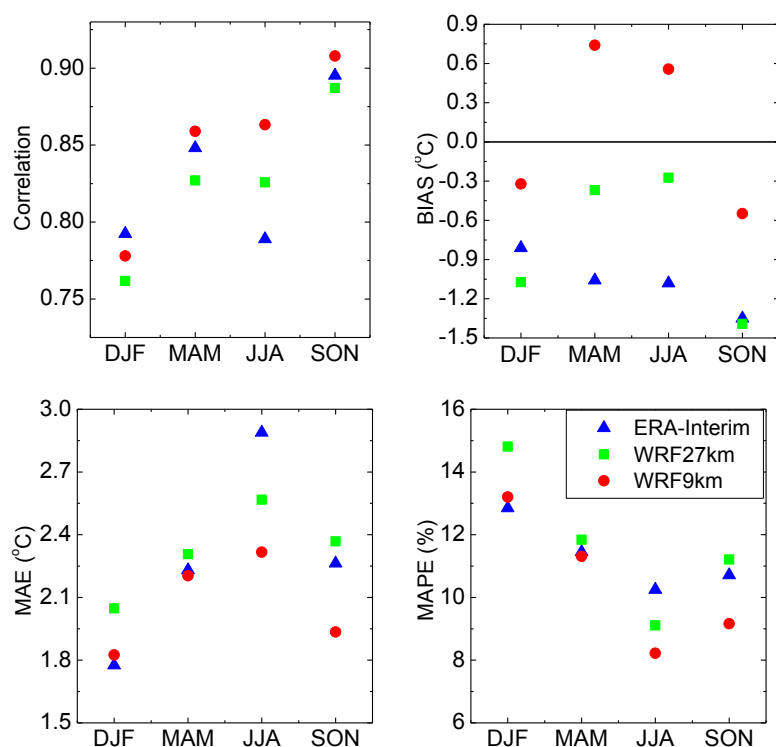
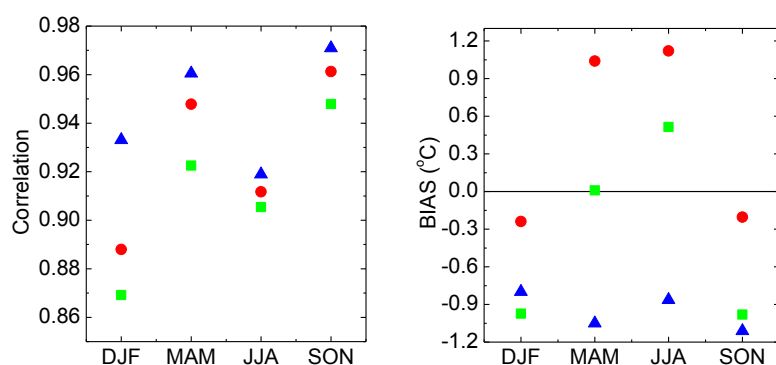


Fig. 14 – Erros diários sazonais para temperatura máxima (Modelos_v_StaObs)

Numa análise semelhante com a grelha E-OBS, observam-se melhorias significativas da correlação na ERA-I. Da Fig.15 pode-se confirmar que, em comparação com estações locais, as correlações aumentaram nos três modelos. Tal como anteriormente, a resolução das circulações térmicas introduz um sinal significativo levando a uma redução do viés do WRF. Observando-se, inclusivamente uma inversão do sinal na Primavera e Verão, estações em que este tipo de circulações é mais intenso.

Nesta comparação entre grelhas, para o Inverno e Outono, os melhores resultados estão no WRF 9km onde parecem ter sido minizados os viés inerentes ao forçamento de larga escala. No MAPE, continuam a verificar-se valores do WRF e ERA-I sempre bastante próximos, especialmente na Primavera e no Verão.



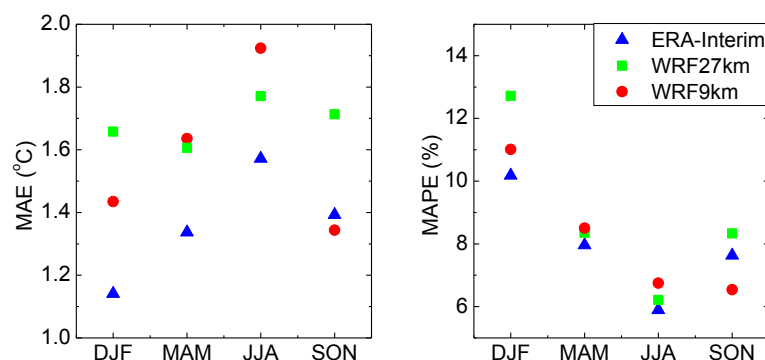


Fig. 15 - Erros diários sazonais para temperatura máxima (Modelos_v_E-OBS)

5.1.2.2 Regiões

À análise sazonal é agora acrescentada uma análise regional, que é fundamental para a representação do desempenho dos modelos dada a heterogeneidade espacial do clima de Portugal.

Portugal foi dividido em 6 regiões: Noroeste (NW), Nordeste (NE), Centro Oeste (CW), Centro Este (CE), Sudoeste (SW) e Sudeste (SE). Em cada região, as medidas estatísticas foram igualmente calculadas, ponto a ponto, numa agregação sazonal, para todos os valores diários de todo o período de simulação.

Na Tabela 6, estão assinalados viés e RMSE sazonais para as 6 regiões em estudo. A negrito estão os valores onde o modelo WRF tem o melhor desempenho. Este tem o viés mais baixo para todas as regiões. Surpreendentemente, no Inverno, as regiões costeiras CW, SW e SE denotam viés muito baixos, chegando a ser zero na região SE, correspondendo a valores de RMSE mais baixos nessas mesmas regiões.

O WRF 27km mostra na sua maioria um sinal de viés negativo para todas as regiões. Este sinal é, em parte, superado e reduzido com o WRF 9km denotando uma mistura de viés negativos e positivos em todas as regiões e estações demonstrando a heterogeneidade espacial de Tmax neste domínio de alta resolução. No Inverno, este tem os menos valores, que são entre $[-0.6, 0.0]$ °C; na Primavera e no Verão ambos os domínios têm um bom desempenho em todas as regiões à excepção das regiões CW e CE, onde os resultados de 27km se mostram como uma melhor aproximação às observações. Em relação à ERA-I, observam-se valores cerca de 0.5 °C mais elevados (em módulo) que os domínios WRF, em todas as regiões e estações do ano.

Tabela 6 – Erros diários sazonais (Modelos_v_StaObs) de Tmax para as 6 regiões.

Tmax		ERA_Interim				WRF_27km				WRF_9km			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Bias	Region												
	NW	-1.2	-1.7	-1.9	-1.7	-1.4	-1.0	-0.7	-1.7	-0.6	0.3	0.4	-0.7
	NE	-0.4	-2.2	-3.3	-2.3	-1.1	-1.1	-0.9	-2.2	-0.2	0.5	0.1	-1.0
	CW	-0.7	-0.9	-0.3	-0.8	-0.7	0.4	1.1	-0.3	-0.2	1.1	1.7	0.3
	CE	-0.9	-0.6	-1.1	-1.4	-1.2	0.5	0.4	-1.4	-0.4	1.4	0.7	-0.7
	SW	-0.6	0.9	3.7	0.4	-1.1	-1.6	-1.8	-1.7	-0.2	0.1	0.2	-0.3
RMSE	SE	-0.6	-1.4	-2.3	-1.8	-0.7	-0.3	-1.0	-1.7	0.0	0.6	-0.4	-1.0
	Region												
	NW	2.7	3.1	3.6	3.0	3.0	3.3	4.0	3.3	2.6	2.9	3.2	2.7
	NE	3.3	3.6	4.6	3.9	3.4	3.2	3.4	3.9	3.4	3.0	3.2	3.2
	CW	1.9	2.9	4.0	2.7	2.1	2.6	3.3	2.5	2.0	2.7	3.3	2.4
	CE	2.4	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	3.1	2.4	3.0	2.8	2.5
RMSE	SW	1.8	3.0	5.4	2.9	2.1	2.9	3.5	2.8	1.9	2.5	2.9	2.2
	SE	2.0	2.8	3.5	2.9	2.3	3.0	3.3	3.1	2.2	3.0	3.0	2.5

Na análise com E-OBS e de uma maneira geral, WRF 27km e WRF 9km têm os melhores valores de viés (Tabela 7). Continua-se a verificar um óptimo desempenho do WRF 9km no Inverno - mais uma vez as mesmas regiões costeiras com viés muito baixos entre $[-0.2, 0.3]$ °C e no Outono entre $[-0.3, 0.0]$ para as mesmas regiões. Na Primavera, o domínio de 27km apresenta os viés mais baixos em todas as regiões, sendo nas regiões oeste ainda mais reduzidos. Todavia, os valores de viés da ERA-I diminuem bastante se tivermos em conta a Tabela 6. Este facto é fácil de constatar na análise de RMSE onde a ERA-I mostra, na maioria das regiões, os valores mais baixos. Com efeito, o modelo de forçamento parece estar mais de acordo com a grelha do que os modelos WRF, mas tal sintonia parece não corresponder à realidade observada, mas sim produto do suavizamento do campo de Tmax na grelha E-OBS para Portugal.

Tabela 7 – Erros diários sazonais (Modelos_v_E-OBS) de Tmax para as 6 regiões.

Tmax		ERA_Interim				WRF_27km				WRF_9km			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Bias	Region												
	NW	-1.0	-0.9	-0.1	-0.8	-0.6	0.0	1.2	-0.6	-0.2	0.9	1.7	0.2
	NE	-0.7	-0.9	-0.9	-1.0	-1.1	0.1	1.0	-1.1	-0.6	1.3	1.8	-0.2
	CW	-0.9	-1.0	-0.4	-1.0	-0.8	0.0	0.4	-0.8	-0.1	0.8	0.4	-0.1
	CE	-0.9	-0.9	-0.7	-1.1	-1.1	0.2	0.9	-1.1	-0.4	1.3	1.5	-0.3
	SW	-0.6	-1.4	-1.8	-1.4	-1.1	-0.4	-0.6	-1.1	0.3	1.0	0.7	0.0
RMSE	SE	-0.6	-1.2	-1.6	-1.4	-1.2	0.1	0.3	-1.2	0.0	1.1	1.0	-0.4
	Region												
	NW	1.5	1.5	1.7	1.5	1.9	1.9	2.5	1.9	1.7	2.1	2.9	1.8
	NE	1.6	1.5	1.8	1.6	2.2	2.0	2.2	2.2	2.1	2.0	2.5	1.8
	CW	1.4	1.6	1.8	1.6	1.9	1.8	2.2	1.9	1.7	2.0	2.7	1.7
	CE	1.4	1.4	1.6	1.7	2.1	1.9	2.0	2.1	1.9	2.0	2.3	1.6
RMSE	SW	1.2	2.3	3.2	2.1	2.2	2.3	3.0	2.2	1.7	2.1	2.6	1.7
	SE	1.2	1.7	2.1	1.9	2.2	2.0	2.2	2.2	1.7	1.9	2.1	1.6

O ciclo anual das médias mensais de Tmax da Fig.16, mostra em todas as regiões uma muito boa aproximação do modelo WRF 9km em relação às observações locais, especialmente no Verão, com a excepção da região CW onde existe um pronunciado desvio em relação às observações. Nesta a ERA-I parece estar mais próxima. De um modo geral, o modelo WRF tem uma boa correlação com as observações, o que aliás já tinha sido verificado na Tabela 1 à escala mensal. Em todas as regiões pode-se confirmar o sinal negativo do viés para ERA-I, só no SW é que esta apresenta um elevado viés positivo chegando aos +4 °C, tal sobrestimação pode ser devida à dificuldade que o modelo IFS tem na representação do efeito amenizador de temperatura associado à brisa marítima, e ao facto de a correcção orográfica não levar em conta a variação sazonal do gradiente de temperatura (Soares *et al.*, 2011). De referir que não deixa de ser extraordinária a proximidade do WRF às observações, especialmente no Verão, onde o clima em Portugal é fortemente influenciado pelas circulações térmicas, e cuja caracterização e simulação são bastante importantes.

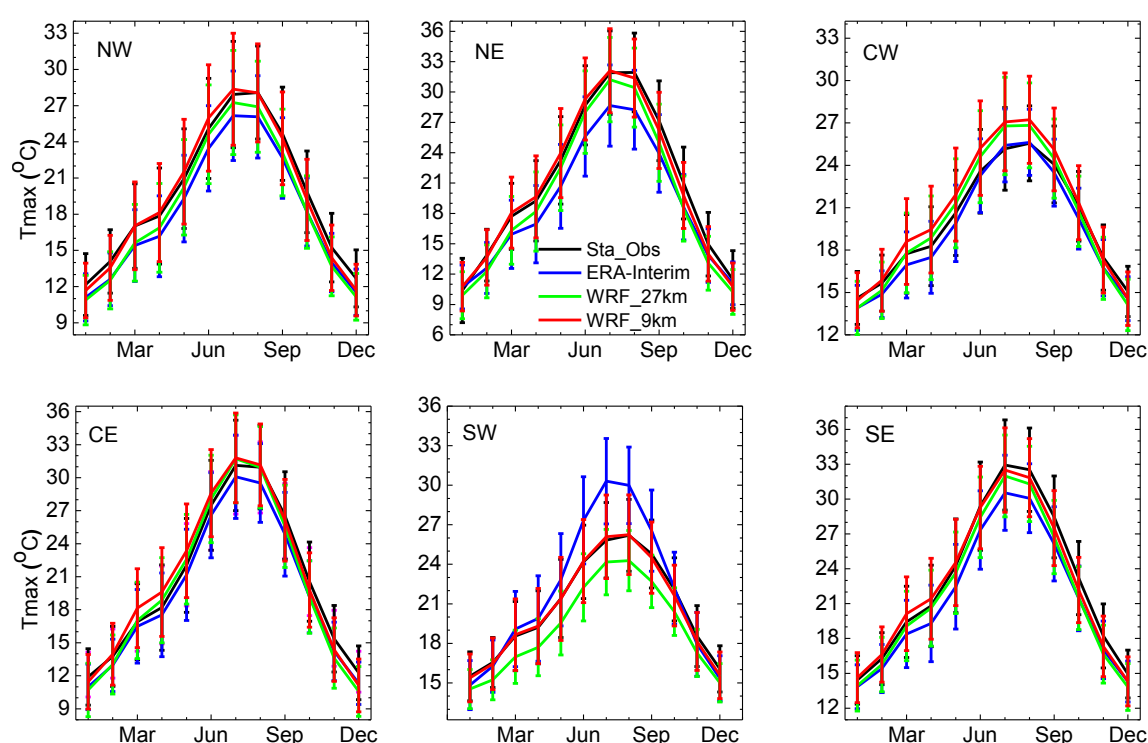


Fig. 16 - Ciclo anual das médias mensais para os 20 anos de Tmax (Modelos e Observações locais).
As barras dizem respeito ao 1- σ .

Ao analisar a Fig.17, que diz respeito ao ciclo anual dos modelos e de E-OBS, pode verificar-se a boa correspondência do modelo WRF com a grelha nos meses de Inverno e Outono já mencionada da análise da Tabela 7. Ao longo de todo o ano, o domínio dos 27km está bastante próximo de E-OBS à excepção das regiões a Norte durante o Verão, onde a ERA-I parece descrever melhor, confirmando assim os resultados da Tabela 7 para estas duas regiões. Relembrando que na Fig. 13 para a estação de Verão, a grelha E-OBS mostra uma subestimação a NW, e mais ainda a NE, quando comparada com as observações locais, tal facto pode influenciar de forma negativa a comparação com o modelo de alta resolução. À semelhança de Caldwell *et al.* (2009) o WRF reproduz muito bem Tmax no Inverno e tem uma tendência para sobrestimar a temperatura nos meses de Verão.

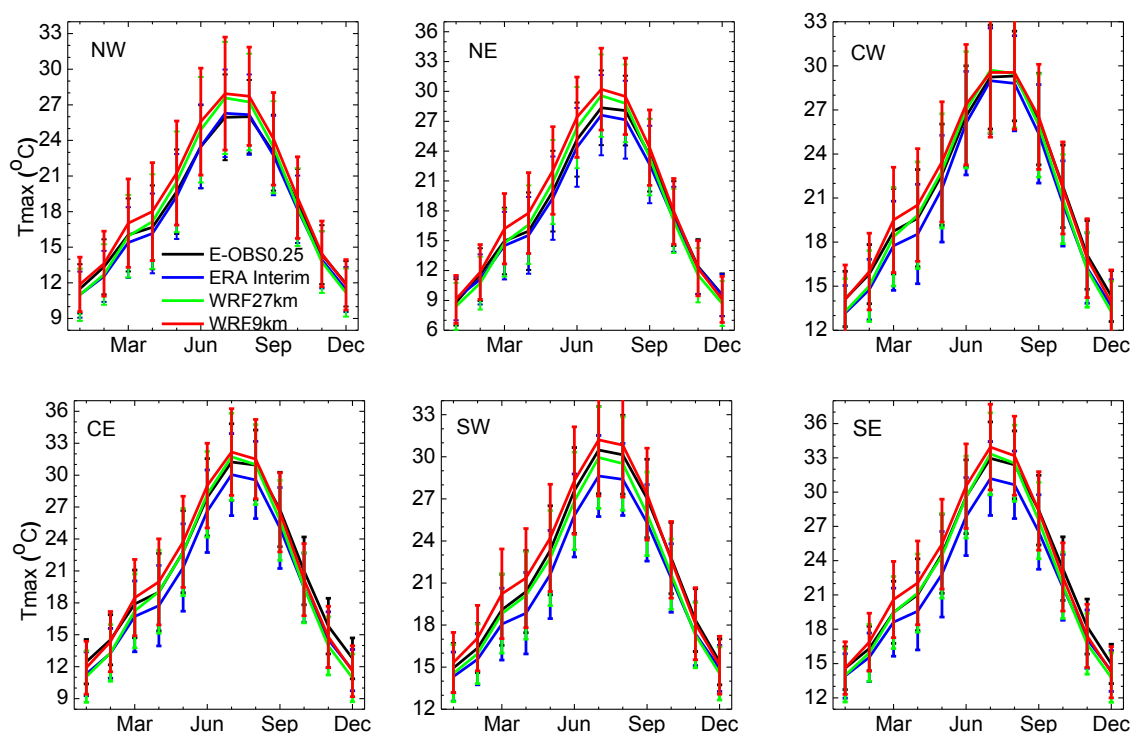


Fig. 17 - Ciclo anual das médias mensais para os 20 anos de Tmax (Modelos e grelha E-OBS). As barras dizem respeito ao 1- σ .

Até agora, analisou-se o comportamento do WRF na simulação de Tmax a nível regional e sazonal. Vamos mais adiante analisar como é que este se comporta na simulação de valores extremos e na distribuição da frequência de Tmax.

5.1.2.3 Histogramas e extremos

Para o cálculo dos histogramas, fez-se a contagem da frequência relativa de eventos diários para todo o domínio de Portugal, em cada estação do ano. Para as quatro estações tem-se uma notável aproximação da curva de distribuição do WRF à curva das observações, tendo em conta o número reduzido de estações observacionais e a sua distribuição geográfica. Em todas as estações do ano tem-se a percepção do sinal negativo do viés para ERA-I para todo o intervalo de temperatura, sinal este que é reduzido, e parcialmente corrigido nas grelhas WRF 27km e 9km. Os histogramas mostram ainda um surpreendente desempenho dos domínios WRF nas estações de transição (Primavera e Outono). No Verão, é de salientar a capacidade do WRF de simular valores mais elevados de Tmax, valores esses que não são reproduzidos pela ERA-I.

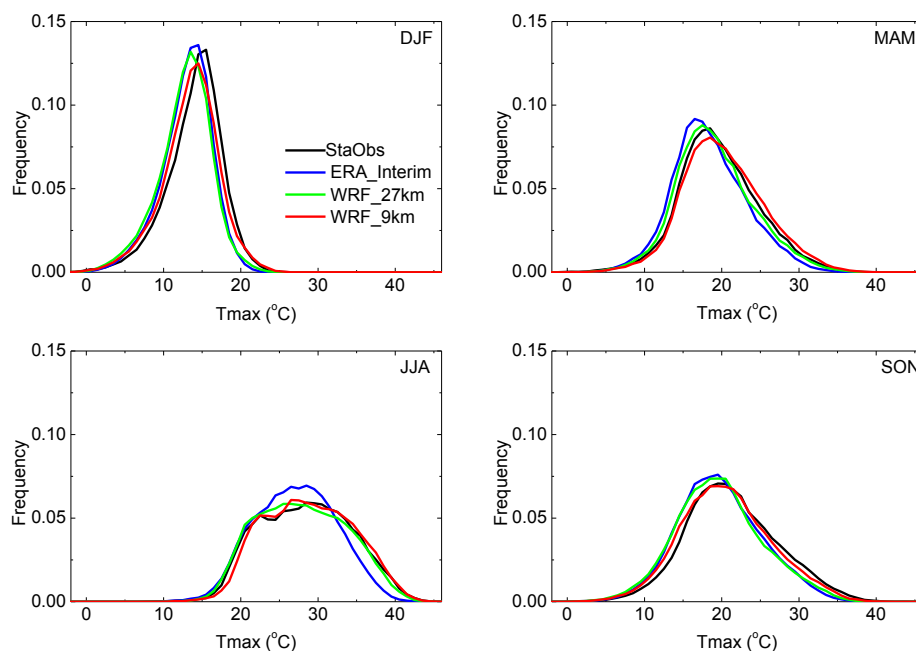


Fig. 18 – Histogramas sazonais para os 20 anos de Tmax (Modelos e Observações locais)

Da Fig. 19 são de salientar algumas diferenças na distribuição de Tmax entre os modelos e a grelha, quando comparadas às distribuições anteriores. Pode observar-se que existe um maior desvio padrão e a distribuição é por isso mais alargada para todos os modelos e E-OBS. Por outro lado, em todas as estações nota-se um desfasamento significativo para esquerda da ERA-I em relação às observações. Desfasamento este que é reduzido pelo modelo WRF, e por vezes até ligeiramente invertido, como é o caso do Verão, onde o WRF 9km tende a ter as maiores frequências nas temperaturas mais elevadas. Nesta estação o WRF 27km tem valores mais próximos das observações, à excepção das frequências em torno da média, onde todos os modelos têm frequências mais reduzidas. Mais uma vez, na Primavera e Outono o WRF mostra excelentes resultados. Mesmo com E-OBS, o modelo de forçamento continua a não ser exemplar na representação de valores extremos.

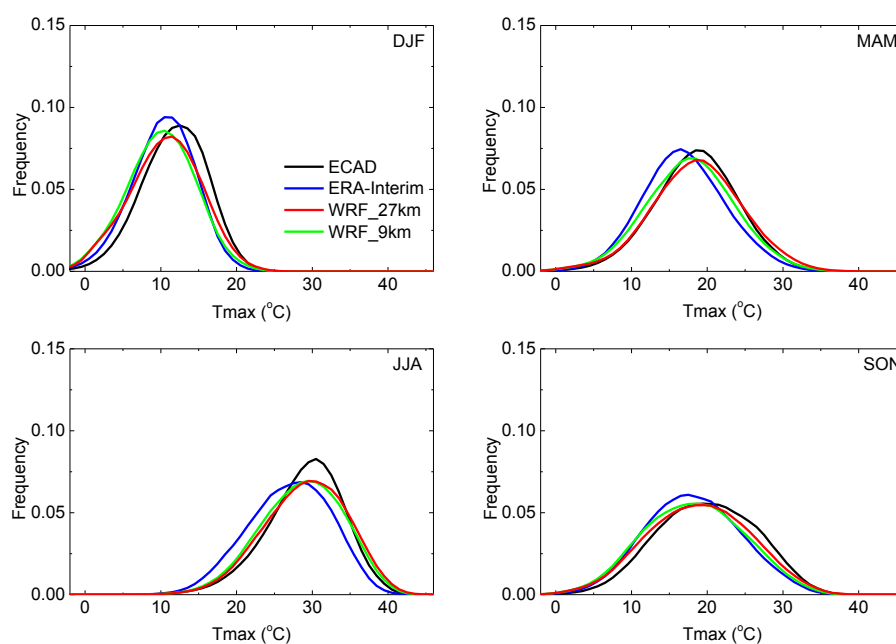


Fig. 19 – Histogramas sazonais para os 20 anos de Tmax (Modelos e grelha)

Pode analisar-se melhor o comportamento dos modelos para valores extremos através do estudo dos quantis apresentados na Fig.20. Foram calculados para as quatro estações do ano, em todo o domínio do território, quantis de 0 a 1, com intervalos de 0.05, em que 0 corresponde ao valor mínimo absoluto de Tmax e 1 ao máximo absoluto.

Mais uma vez pode verificar-se a capacidade de ambos os domínios WRF na representação dos quantis para Tmax. Para todas as estações e sem excepção os dois modelos estão bem próximos das observações, estando no Verão e em parte na Primavera, sob a recta das observações. De salientar é ainda o desempenho dos WRF no primeiro e último quantil, cujos valores correspondem a valores muito próximos dos valores mínimo e máximo absolutos de Tmax, observada nas quatro estações. Sem dúvida que o modelo WRF é notável na representação dos quantis.

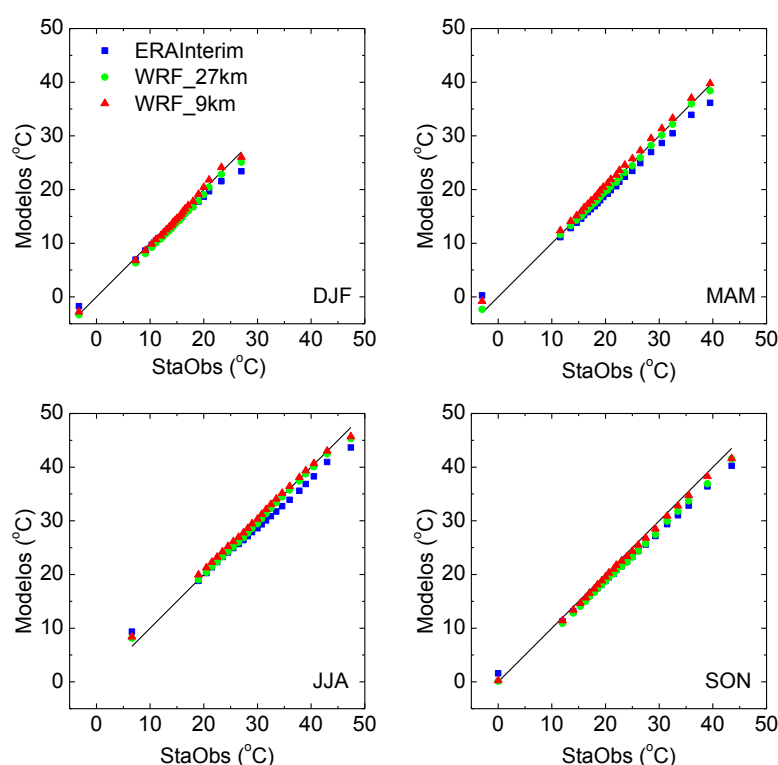


Fig. 20 – Quantis de Tmax de 0 a 1 com intervalos de 0.05 , onde 0 corresponde ao valor mínimo de Tmax e 1 ao máximo para os 20 anos (Modelos e Observações locais)

Da representação dos quantis de Tmax dos modelos e da grelha, o WRF continua a ter o melhor desempenho na caracterização dos quantis. Verifica-se igualmente o primeiro quantil a corresponder ao mínimo absoluto de Tmax observada. O mesmo não se aplica ao último quantil, excepto no Inverno. Durante o Inverno, os quantis representam o que foi mencionado no histograma correspondente: o desfasamento da ERA-I e a recuperação deste através do modelo WRF especialmente para os quantis mais elevados. Nas estações de transição o bom desempenho do WRF mencionado na comparação com estações não é tão evidente, de facto, a ERA-I tem uma boa representação da maioria dos quantis para Tmax, especialmente do quantil mais elevado; o mesmo se observa para o Verão. Este facto pode advir da suavização da topografia e da própria distribuição de Tmax após a interpolação onde os valores mais elevados de Tmax em E-OBS não corresponderem à realidade observada.

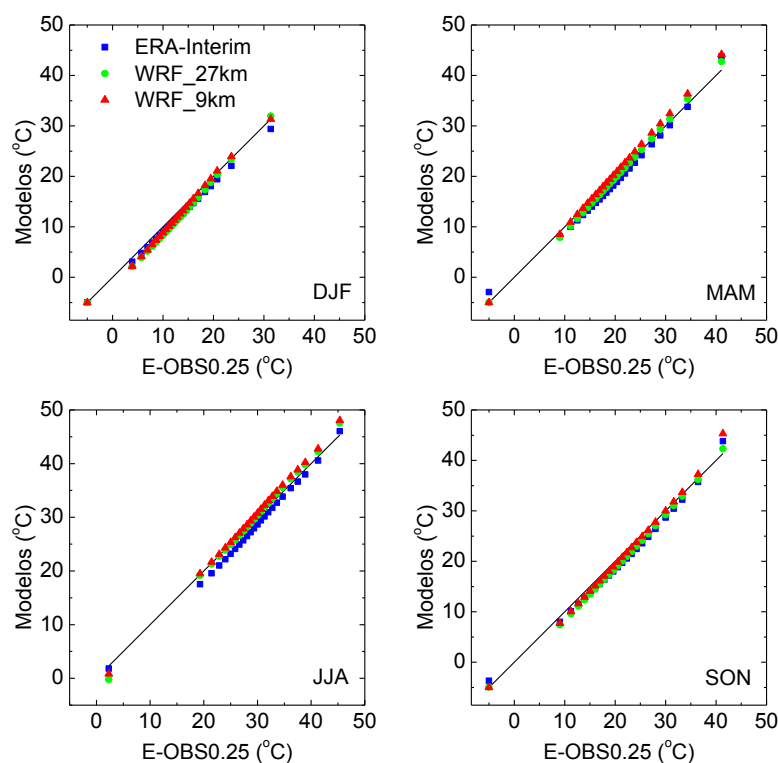


Fig. 21 – Quantis de Tmax de 0 a 1 com intervalos de 0.05 , onde 0 corresponde ao valor mínimo de Tmax e 1 ao máximo para os 20 anos (Modelos e grelha)

Tanto os histogramas como os quantis de Tmax realçam a muito boa qualidade do WRF na representação dos extremos, no que diz respeito às suas frequências e valores absolutos, indicando que os processos de escalar regional e sub-escala que são melhor descritos nos RCM são de extrema importância, nomeadamente na redução dos fortes viés negativos do modelo de forçamento, e que, o WRF de mais alta resolução tem valor acrescentado em relação ao de mais baixa resolução (Soares *et al.*, 2011).

De seguida faz-se uma análise regional dos índices climáticos de Tmax, nomeadamente *Summer days* ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) e *Hot days* ($T_{max} > 35^{\circ}\text{C}$) para as seis regiões, e para todo o domínio. Os índices são apresentados como erros relativos entre número de dias dos modelos e das observações.

Para Portugal, as observações mostram cerca de 88 dias por ano de $T_{máx} > 25^{\circ}\text{C}$. A ERA-I subestima o número de dias em 9 %, o WRF 27km em 10 % e o WRF 9km sobrestima em 6 %. As observações mostram um gradiente Oeste-Este com número maior de dias a Este e menor a Oeste reflectindo o efeito da costa com temperaturas mais baixas ao longo desta. À excepção de na região CW, onde já o ciclo anual de Tmax tinha mostrado uma pior representação do WRF, especialmente nos meses de Verão, o WRF 9km é o que mais se aproxima da realidade, com subestimações e sobrestimações entre [-1,7] % e 27 % na região CW. Os números da ERA-I são mais elevados com subavaliações e sobreavaliações entre [-10,77] %, correspondendo na sua maioria a subestimações. O modelo de forçamento mostra um grande intervalo de valores quando comparado com o WRF.

A Tabela 8 mostra que os *Hot days* são bem menos frequentes que os *Summer days*. Com 12 dias por ano para Portugal, a ERA-I denota uma subestimação de 52 %, 10 % para WRF 27km e uma sobrestimação de 17 % para WRF 9km. A nível regional, existe grande subestimação/sobrestimação em todos os modelos; Nas regiões CW e SW este problema é mais acentuado no domínio WRF de mais alta resolução. Vale a pena referir que os erros no seu módulo para estas regiões são muito baixos, contudo a escassa espacialização e concentração de estações por região afecta os resultados na avaliação dos modelos e a quantificação de extremos pode ser suavizada nesta análise (Soares *et al.*, 2011).

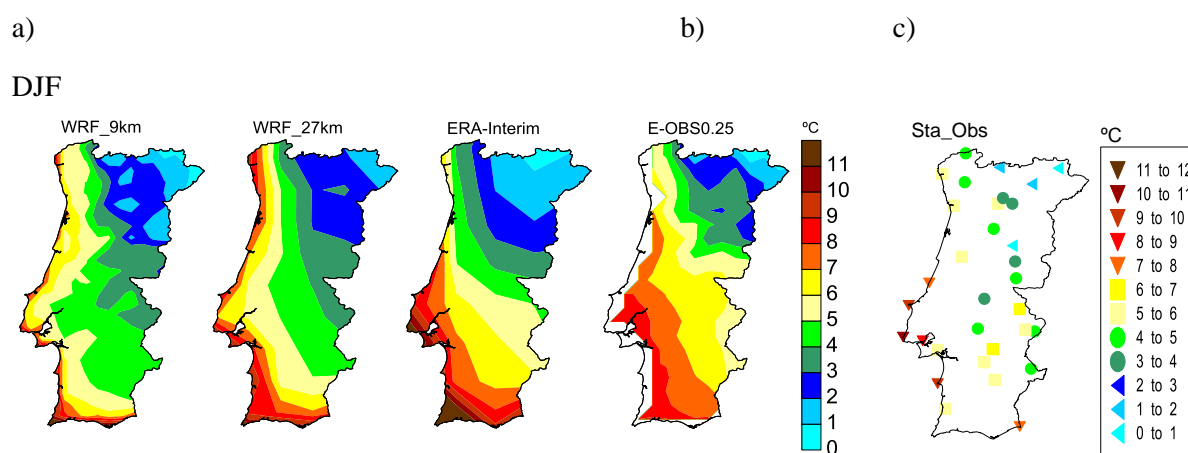
Tabela 8 – Razão entre modelos e Observações do número de *Summer days* ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) e *Hot days* ($T_{max} > 35^{\circ}\text{C}$) para as seis regiões em Portugal.

Region	Summer days % error				Hot days % error			
	Obs(days)	ERA-Interim	WRF 27km	WRF 9km	Obs(days)	ERA-Interim	WRF 27km	WRF 9km
NW	79	-27	-14	4	6	-87	-7	26
NE	111	-27	-13	1	19	-78	-24	0
CW	57	-16	12	27	5	-27	28	85
CE	106	-10	0	7	17	-39	6	24
SW	59	77	-38	7	4	74	-42	82
SE	117	-18	-12	-1	22	-57	-13	-1
Portugal	88	-9	-10	6	12	-52	-10	17

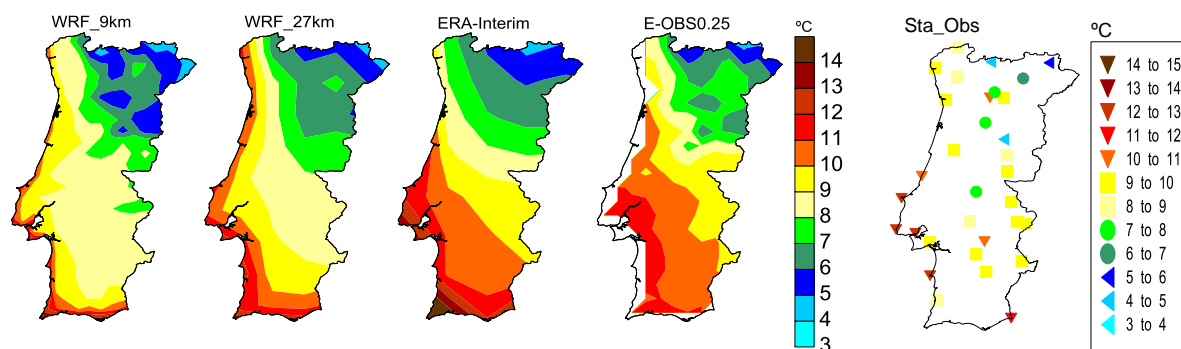
5.1.3 Temperatura mínima

5.1.3.1 Climatologia sazonal

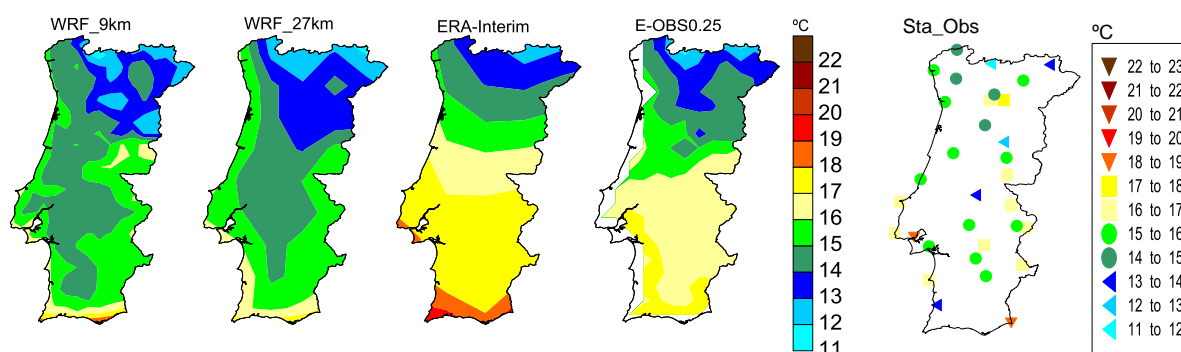
Na Fig.23 estão representados a média de T_{min} diária para os 20 anos, para as quatro estações do ano. À semelhança de T_{max} , nota-se a presença de um gradiente Norte-Sul em todos os modelos em concordância com as observações. Em todas as estações, existe também um gradiente longitudinal, com a zona Oeste mais quente do que a zona Este, efeito visível de Norte a Sul. Tal característica deve-se à influência marítima a Oeste, onde se inibem as temperaturas mais baixas. Mais uma vez, o WRF 9km mostra uma boa qualidade a representar as heterogeneidades espaciais de T_{min} espelhadas nas observações. Mais notável é o efeito da costa presente em todas as estações do ano.



MAM



JJA



SON

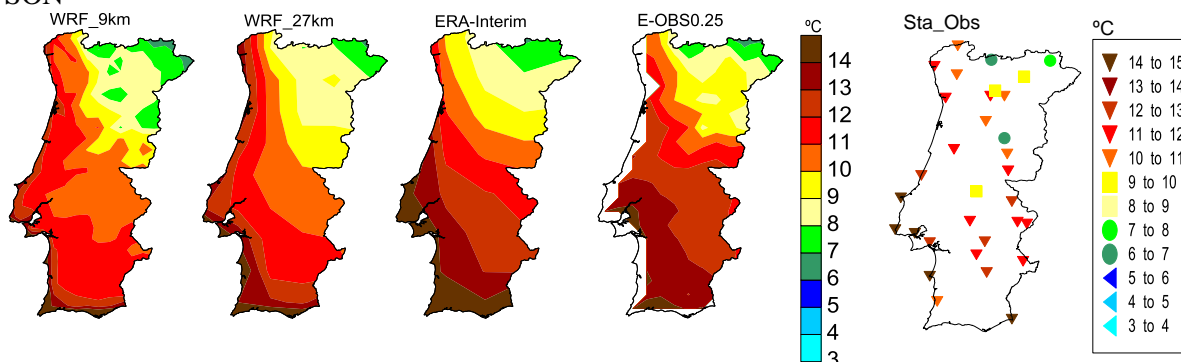


Fig. 23 - Temperatura mínima, média sazonal de 20 anos de simulação: a) modelos; b) Observações grelha; c) Observações locais para as quatro estações : Inverno (DJF), Primavera (MAM), Verão (JJA) e Outono (SON).

As temperaturas de Inverno variam entre $[0,11]$ °C em todos os domínios. Uma característica a referir é o facto da grelha E-OBS não ter o valor de Tmin observado pelas estações na região da Serra da Estrela, sobrestimando até cerca de +3 °C. Este efeito, reflecte-se por sua vez em todos os resultados dos modelos quando comparados com E-OBS. Na Primavera as temperaturas variam entre $[3,13]$ °C de Nordeste a Sudoeste, com uma sobrestimação da ERA-I, especialmente no Nordeste.

Durante o Verão tem-se em média valores entre $[11,19]$ °C, com a ERA-I a sobrestimar o campo de Tmin durante esta estação, especialmente no Centro e Sul. Em todas as estações do ano verifica-se a sobrestimação de valores na distribuição de Tmin no caso da ERA-I e E-OBS.

A Fig.24 apresenta as estatísticas sazonais na comparação dos modelos com as observações locais. Em comparação com Tmax, Tmin apresenta valores de correlação menos elevados e erros mais altos. Em todas as estações do ano, o domínio de mais alta resolução é o que apresenta maiores correlações, onde a maior diferença entre WRF 9km e ERA-I é no Verão. O WRF 27km é o que possui correlações mais baixas. À semelhança de Zhang *et al.* (2009), para Tmin, as maiores resoluções nem sempre implicam maiores correlações. Mas tal não se verifica na análise dos erros, onde o sinal predominantemente positivo de viés para a ERA-I é reduzido no WRF, com um sinal maioritariamente negativo, em que o WRF 27km é o que exibe viés mais baixos. Para o MAE, o WRF 9km é o que denota os valores mais reduzidos, especialmente na Primavera e no Verão.

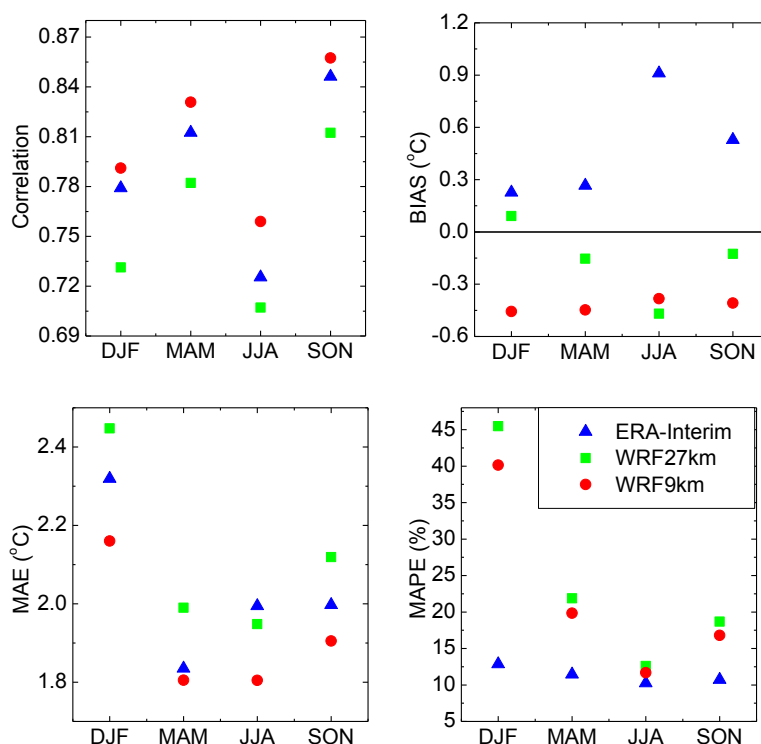


Fig. 24 -Erros diários sazonais para Tmin (Modelos_v_StaObs)

Na comparação dos modelos com a grelha e à semelhança do que se observou em Tmax, existe um aumento das correlações e uma diminuição dos erros para todos os domínios. A Fig.25, mostra os resultados das quantidades estatísticas em estudo. Através da análise das médias climatológicas apresentadas no início deste capítulo (Fig. 23), a ERA-I mostra uma clara sobrestimação de Tmin na mesma medida em todo o território. Tal efeito, é demonstrado não só nas correlações, como nos VIÈS onde ERA-I, e também o WRF 27km denotam os melhores resultados.

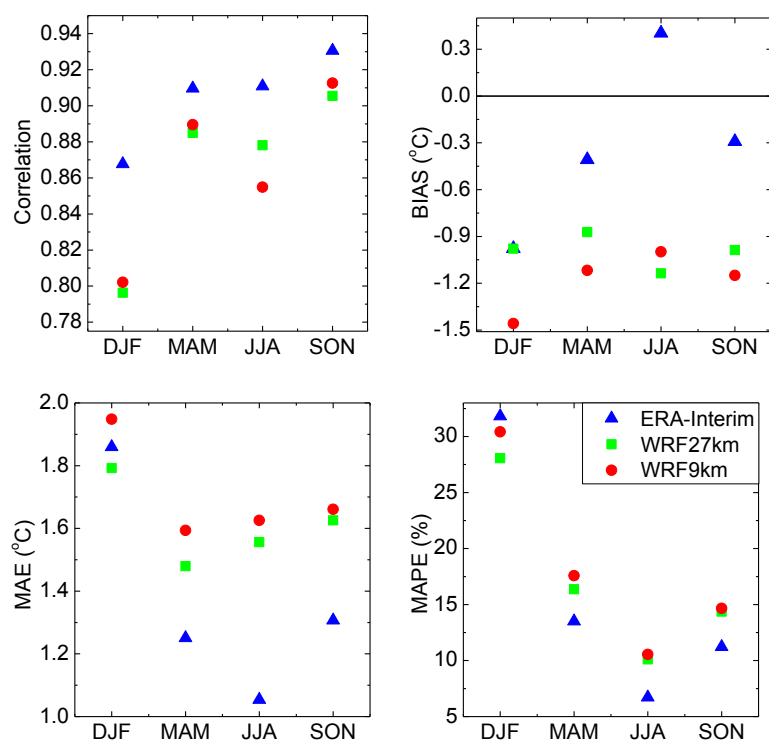


Fig. 15 - Erros diários sazonais para Tmin (Modelos_v_E-OBS)

5.1.3.2 Regiões

Na Tabela 9 apresentam-se o viés e RMSE para as seis regiões em cada estação do ano. Analogamente a Tmax, os valores a negrito indicam os valores em que o WRF apresenta melhor desempenho. Numa visão global, verifica-se o sinal positivo de viés para ERA-I, à excepção do NW e CE. Este sinal é parcialmente reduzido a 27km e praticamente negativo na grelha a 9km. Ao contrário de Tmax onde WRF 9km apresentava uma mistura de sinais de viés, para Tmin este tende a ser mais frio que as observações. Contudo, é o que apresenta os valores mais baixos, sendo o maior valor encontrado de 1.1 °C no Inverno na região do CE, e o mais baixo é de 0.0 °C a NW também no Inverno. Verifica-se no modelo WRF a melhoria da descrição do efeito da costa em todas as estações, efeito esse que não é claro no caso da ERA-I, onde os erros nas regiões oeste são mais elevados.

Em relação a RMSE, o WRF 9km é notável, exibindo os valores mais baixos para todas as regiões e estações do ano, especialmente no Inverno e Verão, onde a ERA-I revela valores de RMSE mais elevados em cerca de 0.5 °C.

Tabela 9 – Erros diários sazonais (Modelos_v_StaObs) de Tmin para as 6 regiões.

Tmin		ERA_Interim				WRF_27km				WRF_9km			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Bias	Region												
	NW	-0.8	-0.6	0.3	-0.2	0.6	0.0	-0.3	0.2	0.0	-0.3	-0.2	-0.1
	NE	1.1	0.4	0.2	0.9	1.6	0.6	-0.4	0.7	0.9	0.1	-0.6	0.2
	CW	1.4	1.0	1.6	1.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-1.0	-0.7	-0.3	-0.5
	CE	-0.8	-0.2	0.4	-0.2	-1.2	-0.9	-1.1	-1.2	-1.1	-0.7	-0.7	-0.9
	SW	0.8	1.0	2.3	1.4	2.4	1.8	1.2	2.0	0.3	0.4	0.4	0.5
	SE	1.0	0.9	1.4	0.9	-0.1	-0.3	-0.6	-0.5	-1.0	-0.8	-0.7	-0.9
RMSE	Region												
	NW	2.9	2.2	2.1	2.3	2.8	2.2	2.1	2.4	2.5	2.2	2.2	2.3
	NE	2.9	2.5	2.4	2.6	3.1	2.6	2.5	2.6	2.8	2.6	2.6	2.5
	CW	2.9	2.2	2.7	2.7	2.9	2.4	2.5	2.5	2.6	2.1	2.2	2.2
	CE	3.4	2.9	3.2	3.1	3.3	2.9	3.0	3.1	2.9	2.5	2.6	2.7
	SW	3.0	2.8	3.3	2.9	4.0	3.3	3.0	3.6	2.6	2.3	2.4	2.5
	SE	2.9	2.2	2.2	2.3	3.1	2.3	2.0	2.4	2.8	2.2	1.9	2.2

Na Tabela 10, estão apresentados os resultados da comparação dos modelos com a grelha E-OBS. De imediato verifica-se a redução dos erros em todas as regiões e estações, bem como uma mistura de sinais de viés na ERA-I. Só no Verão é que o sinal continua a indicar a sobrestimação (para todas as regiões) inerente ao modelo de forçamento, factor este que já tinha sido referido na climatologia anual e sazonal. O WRF 27km e WRF 9km possuem viés negativos para todas as estações e regiões. De novo, tem-se um melhor desempenho do WRF 27km com E-OBS do que o WRF 9km. Note-se que no RMSE, onde o WRF 9km exhibe os melhores a NW e NE na comparação com a grelha, são exactamente as mesmas regiões onde na comparação com as observações locais o RMSE era pior. Esta melhoria poderá ser uma melhoria fictícia pois a grelha não parece espelhar de forma correcta as observações locais de Tmin (e Tmax).

Tabela 10 – Erros diários sazonais (Modelos_v_E-OBS) de Tmin para as 6 regiões.

Tmin		ERA_Interim				WRF_27km				WRF_9km			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Bias	Region												
	NW	-1.6	-0.7	0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.4	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2
	NE	-0.9	-0.6	0.2	-0.3	0.2	-0.2	-0.5	0.0	-0.5	-0.8	-0.6	-0.5
	CW	-1.4	-0.6	0.6	-0.5	-2.0	-1.4	-1.6	-1.7	-2.1	-1.5	-1.5	-1.7
	CE	-1.8	-0.8	0.1	-0.9	-1.9	-1.3	-1.3	-1.6	-2.0	-1.3	-0.9	-1.5
	SW	0.3	0.4	0.5	0.4	-1.1	-0.9	-1.6	-1.2	-2.2	-1.6	-1.8	-1.8
	SE	-0.1	0.1	0.5	0.0	-1.2	-0.9	-1.3	-1.2	-1.8	-1.3	-1.4	-1.5
RMSE	Region												
	NW	2.6	1.7	1.4	1.7	1.8	1.7	1.7	1.6	1.8	1.7	1.9	1.7
	NE	2.2	1.6	1.3	1.6	1.7	1.6	1.5	1.6	1.8	1.7	1.6	1.6
	CW	2.6	1.7	1.5	1.8	2.9	2.2	2.2	2.5	3.1	2.3	2.3	2.6
	CE	2.8	1.7	1.4	1.9	2.6	2.1	2.0	2.3	2.7	2.1	2.0	2.2
	SW	2.5	1.8	1.3	1.9	3.2	2.4	2.4	2.7	3.1	2.3	2.4	2.6
	SE	1.5	1.2	1.2	1.2	2.3	1.8	1.9	2.0	2.5	1.9	1.9	2.1

A distribuição da média mensal de Tmin ao longo do ano pelas seis regiões é apresentada na Fig.26. Em todas as regiões, o modelo ERA-I é o que apresenta temperaturas mais elevadas do que as que se observam ao longo do ano, excepto no NW e CE onde este subestima os valores de Tmin nos meses de Inverno e na transição para os meses da Primavera. O modelo WRF, recupera muito bem esta subavaliação do modelo de forçamento na região NW, especialmente o WRF 9km.

Tal recuperação deverá estar associada, por um lado, ao efeito da costa e à orografia local, efeitos estes pior representados pela ERA-I. A NE todos os modelos subestimam as observações nos meses de Verão e sobestimam nos meses de Inverno. O WRF 9km genericamente comporta-se de acordo as observações em todas as regiões, não deixando dúvidas quanto à sua capacidade de representar as médias mensais a nível regional.

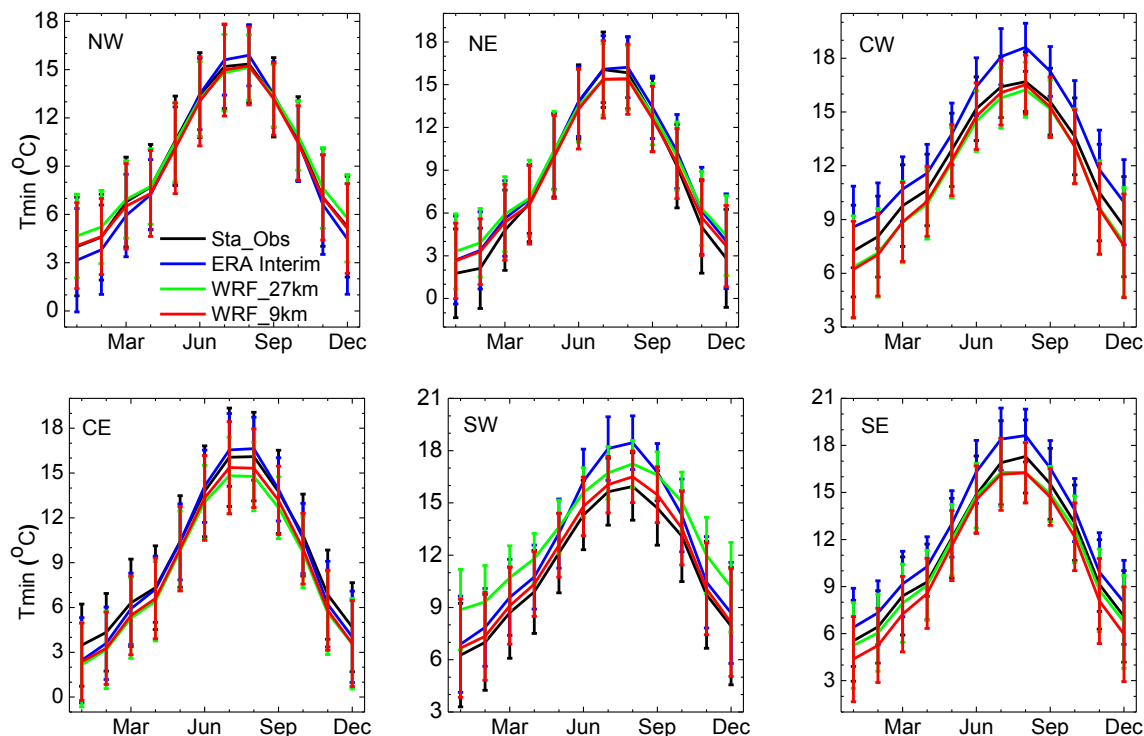


Fig. 26 - Ciclo anual das médias mensais para os 20 anos de Tmin (Modelos e Observações locais).
As barras dizem respeito ao $1-\sigma$.

O ciclo anual apresentado na Fig.27 dos modelos em relação a E-OBS mostra parte da informação contida na Tabela 10. Uma sobrestimação da ERA-I especialmente no Verão em relação à grelha e uma subestimação de Inverno. Para todos os modelos percepcionam-se as correlação mensais elevadas da Tabela 2, cujos valores eram de 0.97 e 0.96 para o WRF 27km e WRF 9km respectivamente e de 0.98 para ERA-I. De facto a variação mensal de Tmin é bem representada pelos modelos, mas a amplitude de Tmin é melhor simulada pela ERA-I em todas as regiões, apesar de alguns desvios consideráveis nos meses de Inverno a NW e CE.

A melhoria aparente dos resultados do desempenho da ERA-I nas regiões centro e sul vem em concordância com a sobrestimação análoga da ERA-I e E-OBS, especialmente no Sul onde a melhoria é significativa todo ano. No CW o facto de não haver informação de costa em E-OBS faz com que os meses de Inverno tenham desvios consideráveis em todos os domínios.

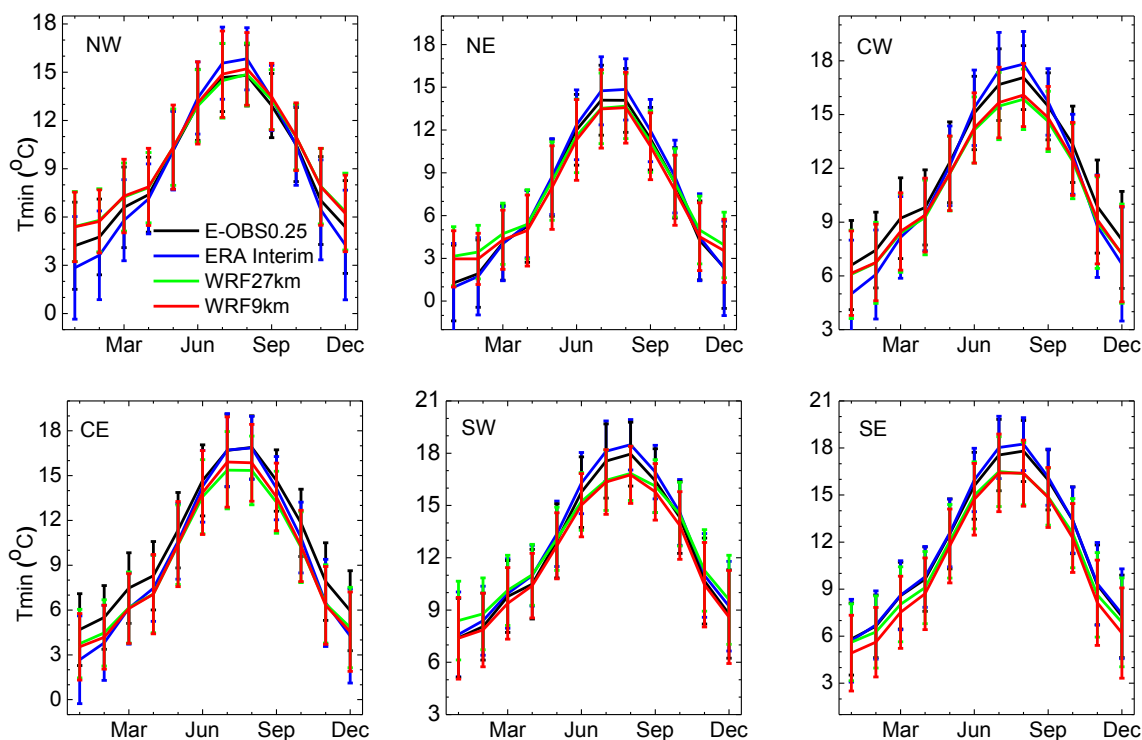


Fig. 27 - Ciclo anual das médias mensais para os 20 anos de Tmin (Modelos e grelha E-OBS). As barras dizem respeito ao $1-\sigma$.

De seguida, mostra-se as distribuições sazonais de frequências e eventos extremos na análise de histogramas e quantis.

5.1.3.3 Histogramas e extremos

A Fig.29 apresenta para as quatro estações os histogramas de Tmin para todos os modelos e observações locais. Durante o Inverno é visível o sinal positivo da ERA-I em relação às observações no que diz respeito à frequência de eventos com temperaturas negativas, sinal esse, que o modelo WRF 9km corrige. Em direcção às temperaturas mais elevadas, o WRF 27km parece estar mais próximo das observações. De novo a ERA-I apresenta uma sobrestimação considerável e o WRF 9km uma sobrestimação ligeira. Durante a Primavera, parece haver um bom ajuste dos modelos às observações, contudo denota-se uma ligeira sobrestimação das frequências das temperaturas mais baixas por parte do WRF.

No Verão e Outono é onde se verifica uma maior dificuldade do modelo de forçamento em simular a distribuição de Tmin. Praticamente em todo o intervalo, a ERA-I sofre um considerável desfasamento em relação às observações. O modelo WRF, parece representar melhor as mesmas, nomeadamente no que diz respeito às temperaturas mais afastadas da mediana. Contudo, as maiores frequências de Tmin parecem não ser tão bem representadas por todos os modelos, especialmente pela ERA-I.

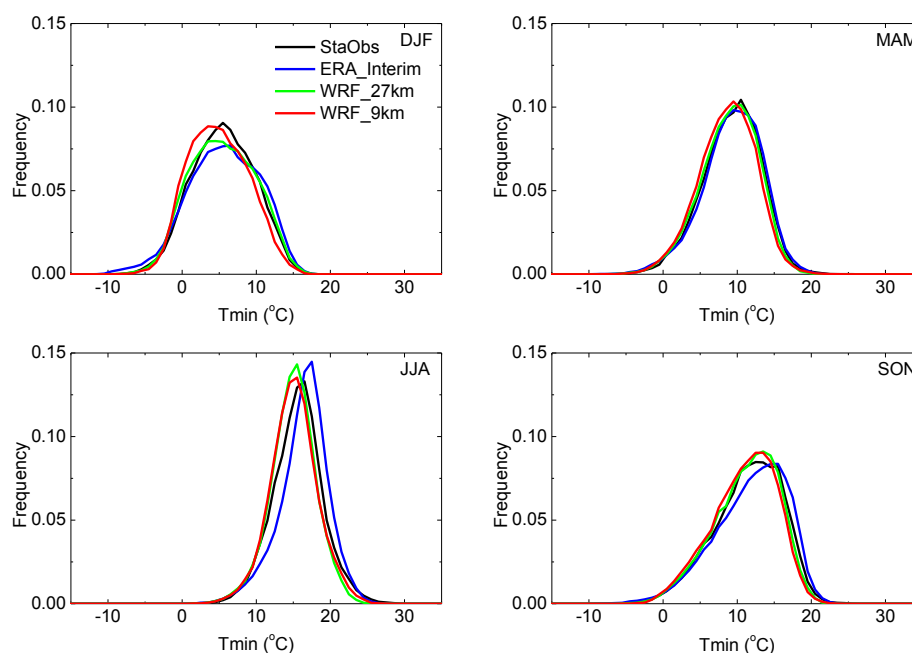


Fig. 29 – Histogramas sazonais para os 20 anos de Tmin (Modelos e StaObs)

Na Fig.30 a mesma análise é feita com a grelha regular em vez de observações locais. De notar a proximidade entre ERA-I e E-OBS, especialmente no que diz respeito a eventos mais frequentes, propriedade que não era constatável na comparação com as estações locais. Todavia, os eventos menos frequentes em temperaturas mais baixas são bem representados por todos os modelos, em especial o WRF 27km. Tal característica é visível em todas as estações menos no Verão onde existe uma clara sobrestimação do modelo WRF. Contudo o modelo WRF mostrar a sua capacidade em simular os eventos menos frequentes.

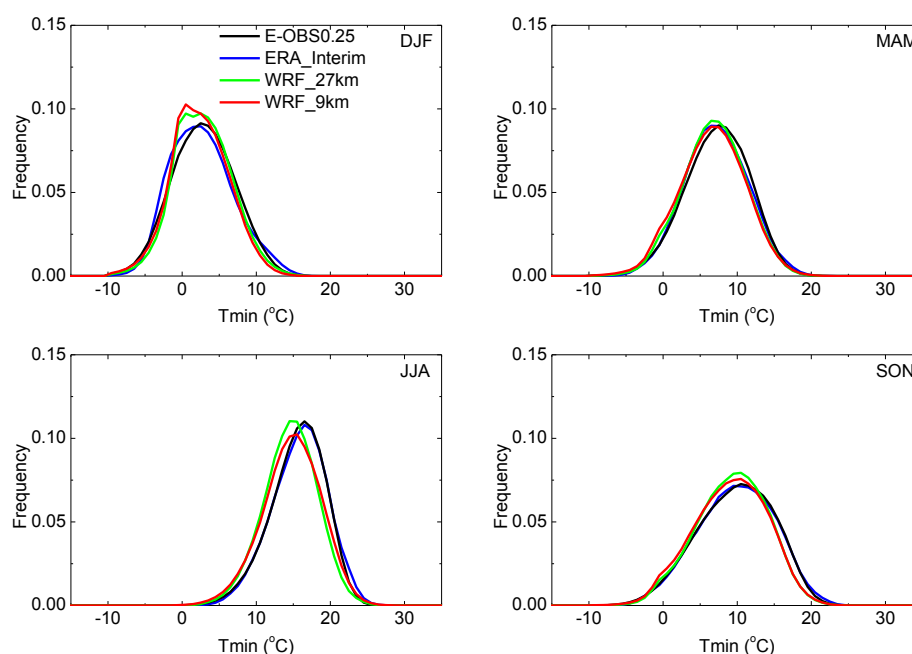


Fig. 30 – Histogramas sazonais para os 20 anos de Tmin (Modelos e grelha)

Na Fig. 31 estão representados os quantis calculados de maneira análoga a Tmax. Para as quatro estações do ano verifica-se a capacidade do WRF para representar o mínimo absoluto de Tmin correspondendo ao primeiro quantil. Valor esse que a ERA-I, à excepção do Verão, não consegue simular. Mais uma vez é notável a capacidade do modelo regional WRF de representar valores extremos, capacidade essa que corrobora a análise dos histogramas. Outra característica visível nas Fig. 31 é a melhoria nos quantis nas estações de Verão e Outono por parte do WRF, exactamente onde a ERA-I falha na representação das temperaturas mais baixas.

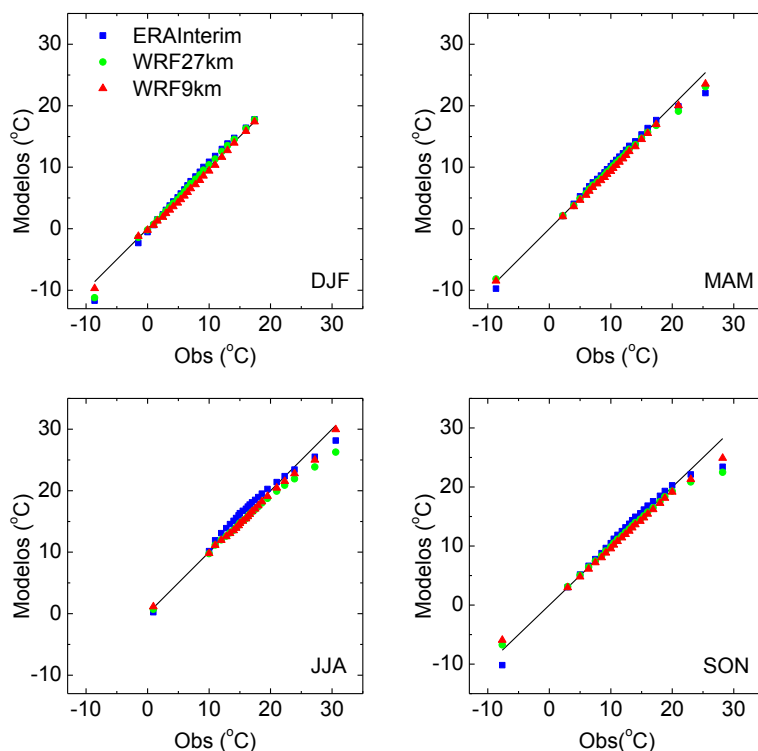


Fig. 31 – Quantis de 0 a 1 com intervalos de 0.05, onde 0 corresponde ao valor mínimo de Tmin e 1 ao máximo para os 20 anos (Modelos e Observações locais)

Na Fig. 32 pode observar os quantis dos modelos e da grelha E-OBS. Verifica-se de imediato que o modelos WRF e ERA-I representam bem os valores mínimos da grelha E-OBS. Capacidade essa que não está patente nos quantis mais elevados, à excepção do Inverno, nem mesmo para a ERA-I. Contudo, na primeira metade dos quantis e à excepção do que se passa no Inverno, o modelo WRF 27km parece estar em linha com E-OBS, especialmente nas estações de transição. Mais uma vez nesta comparação, verifica-se que a ERA-I representa bem os quantis de Tmin, especialmente no Inverno e Verão, onde as diferenças com os modelos WRF na primeira metade dos quantis são mais visíveis.

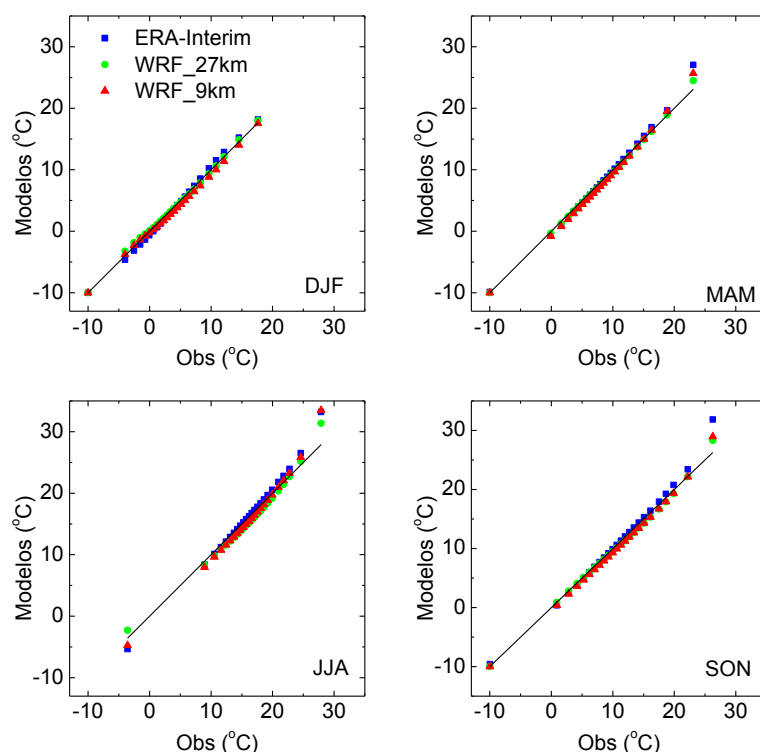


Fig. 32 – Quantis de 0 a 1 com intervalos de 0.05 , onde 0 corresponde ao valor mínimo de Tmin e 1 ao máximo para os 20 anos (Modelos e Observações grelhadas)

Para Tmin, foi efectuado o cálculo de *Frost days* ($T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$) e *Tropical nights* ($T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$) para a representação de valores extremos absolutos. Numa primeira abordagem para os dois índices, nota-se um gradiente Oeste-Este visível nas climatologias já discutidas. Os *Frost days* são mais frequentes mas nem por isso mais fáceis de simular segundo os resultados da Tabela 11. Para todas as regiões existem sobrestimações e subestimações significativas. Comece-se pela região NE com a ERA-I a subestimar em cerca de 31 % e WRF 27km e 9km 66 % e 40 %, respectivamente.

De facto, é para o interior de Portugal que os modelos têm maior dificuldade em simular estas temperaturas. De qualquer modo o modelo WRF tende a simular melhor que a ERA-I, à excepção do SE, onde sobrestima em mais de 200 % estas temperaturas extremas. Em termos globais, WRF 9km é o que demonstra melhor capacidade para simular esta quantidade com 4 % de sobrestimação, enquanto ERA-I sobrestima em cerca de 8 %. Em relação a *Tropical nights* estas são menos frequentes que *Frost days*, especificamente nas regiões Norte e CE. No CW, SW e SE ambos os domínios WRF têm os melhores valores em comparação com a ERA-I. A NE todos os modelos subestimam o número de dias de *Tropical Nights*, o WRF 9km e a ERA-I com valores bastante próximos, -29 % e -27 %, respectivamente. Para todas as regiões o WRF 9km apresenta valores de erro relativo entre [-41,73] %, o WRF 27km entre [-66,142] % e ERA-I entre [-27,664] %. Para Portugal a ERA-I sobrestima cerca de 65 %, WRF 27km subestima a -35 % e o modelo WRF 9km a -19 %, sendo este último o mais próximo das observações.

Tabela 11 – Razão entre modelos e Observações do número de Frost days ($T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e Tropical nights ($T_{min} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) para as seis regiões e Portugal.

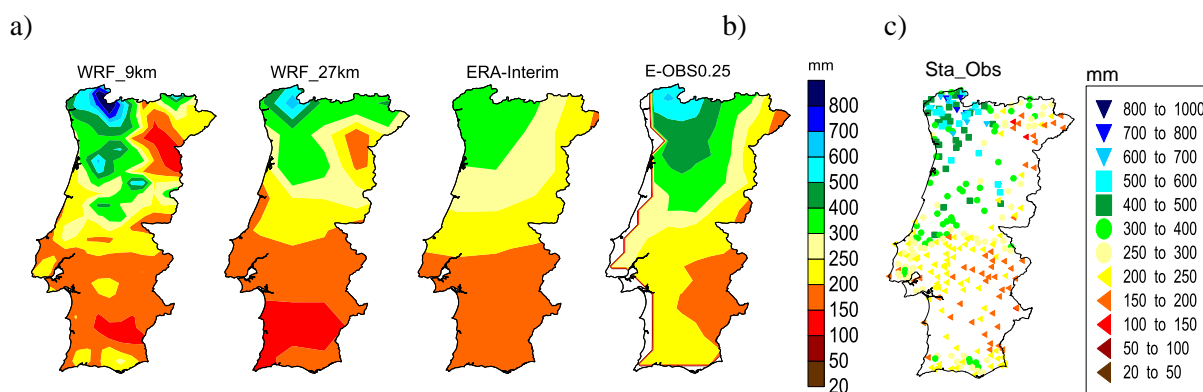
Region	Frost days % error				Tropical nights % error			
	Obs (days)	ERA-Interim	WRF 27km	WRF 9km	Obs(days)	ERA-Interim	WRF 27km	WRF 9km
NW	22	116	15	18	6	14	-13	60
NE	23	-31	-66	-40	6	-27	-53	-29
CW	1	-45	43	32	4	146	-45	-5
CE	23	65	78	44	7	-1	-66	-38
SW	0	-94	-49	35	3	664	142	73
SE	2	-16	224	244	7	98	-21	-41
Portugal	12	8	-9	4	5	65	-35	-19

5.1.4 Precipitação

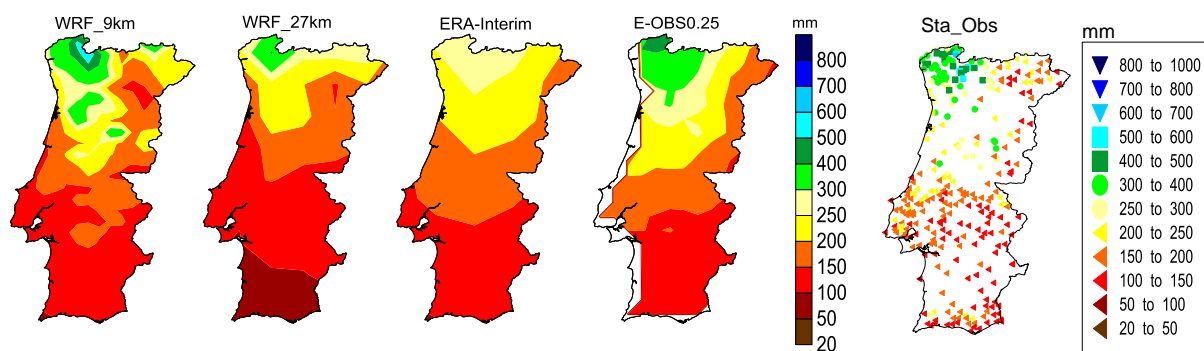
5.1.4.1 Climatologia sazonal

Na Fig.33 está presente a climatologia sazonal dos vinte anos de simulação para a precipitação acumulada. À semelhança da climatologia anual global, o WRF 9km mostra uma maior capacidade para representar as heterogeneidades espaciais visíveis nas observações locais. De Inverno e no NW atingem-se máximos de 1000 mm nas observações locais e WRF 9km, com 700 mm no WRF 27km e grelha E-OBS e 500 mm na ERA. O Sudeste é bastante seco mesmo no Inverno, com valores de 150 mm no modelo WRF e 200 mm nas observações locais e grelha. Ainda assim, a grelha E-OBS não revela os mínimos e máximos observados a Nordeste, tendo a ERA-I um comportamento similar à esta grelha. Em contraste com o Inverno, tem-se um Verão muito pouco chuvoso, com máximos de 250 mm a Noroeste e um mínimo de 10 mm a Sudeste nas observações locais. O WRF 9km representa o máximo a Noroeste com 150 mm, mas só os domínios WRF denotam o mínimo de 10 mm a Sudeste. Note-se que para todas as estações à excepção do Verão, o mínimo de precipitação a Nordeste só é representado pelo WRF 9km.

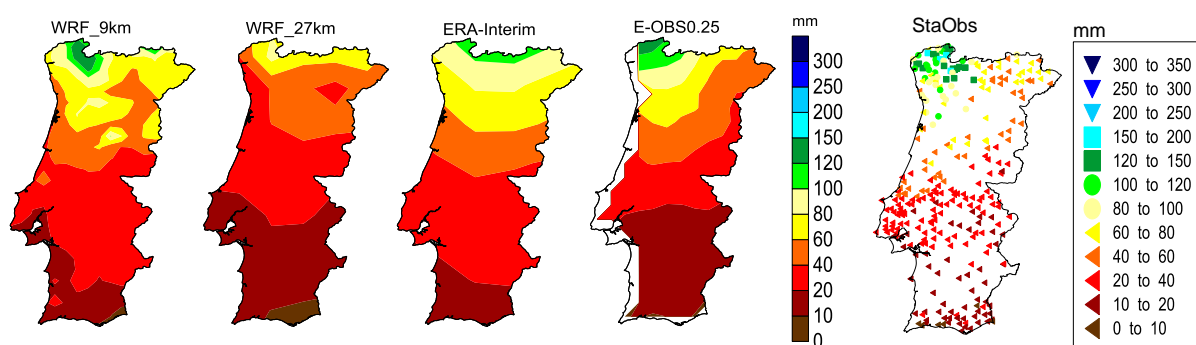
DJF



MAM



JJA



SON

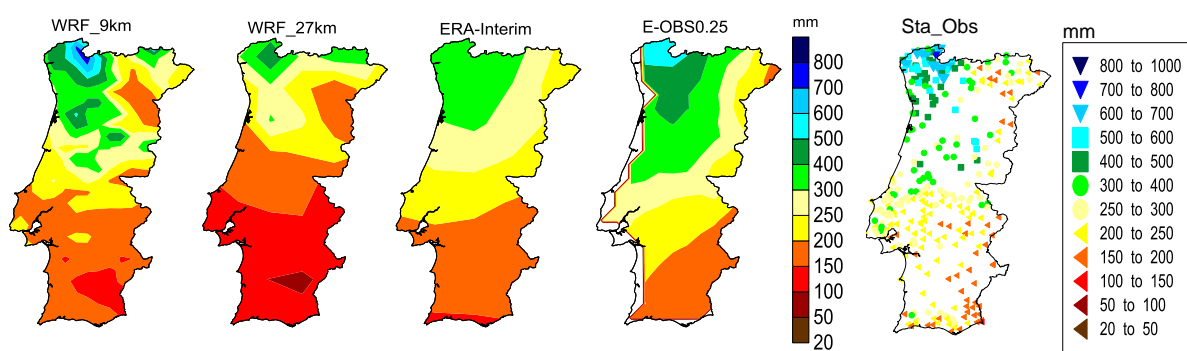


Fig. 33 - Precipitação acumulada, médias sazonais dos 20 anos de simulação : a) modelos; b) Observações grelha; e c) Observações locais para as quatro estações : Inverno (DJF), Primavera (MAM), Verão (JJA) e Outono (SON).

NA Fig.34 apresentam-se as quantidades estatísticas nas quatro estações do ano para a precipitação acumulada diária Fig.34a, e sazonal Fig.34b. Os coeficientes de correlação são mais baixos para o domínio de 27km do WRF e mais elevados para o de 9km, especialmente no Inverno, com o coeficiente acima de 0.75. De facto a capacidade do WRF 27km fica aquém do WRF 9km na simulação da precipitação, com as correlações mais baixas e os erros mais elevados. De salientar-se a capacidade de ERA-I de simular a precipitação, apresentando medidas estatísticas muito próximas do WRF 9km. Todavia, a diferença entre ERA-I e WRF 9km torna-se mais evidente quando se passa para a agregação sazonal, em que o WRF 9km denota valores de correlação mais elevados para todas as estações. A diferença mais evidente é no Verão em que o WRF tem uma correlação perto de 0.80 e a ERA-I abaixo de 0.75.

Os viés normalizados (viés%) para WRF 9km são baixos entre $[-12,-1]$ %, sendo mínimos no Verão. Note-se que o Verão é a estação seca, por isso o viés mais reduzido diz respeito a uma estação com uma precipitação diária de poucas dezenas de mm. Notável é o viés normalizado na estação mais húmida (Inverno), que para o WRF 9km é de cerca de 10 %. O MAPE diário do WRF 9km no Inverno é de 65 %, e na acumulação sazonal passa para 25 %. Na avaliação sazonal, o WRF 27km não mostra melhorias significativas para a precipitação em relação ao modelo de reanálise.

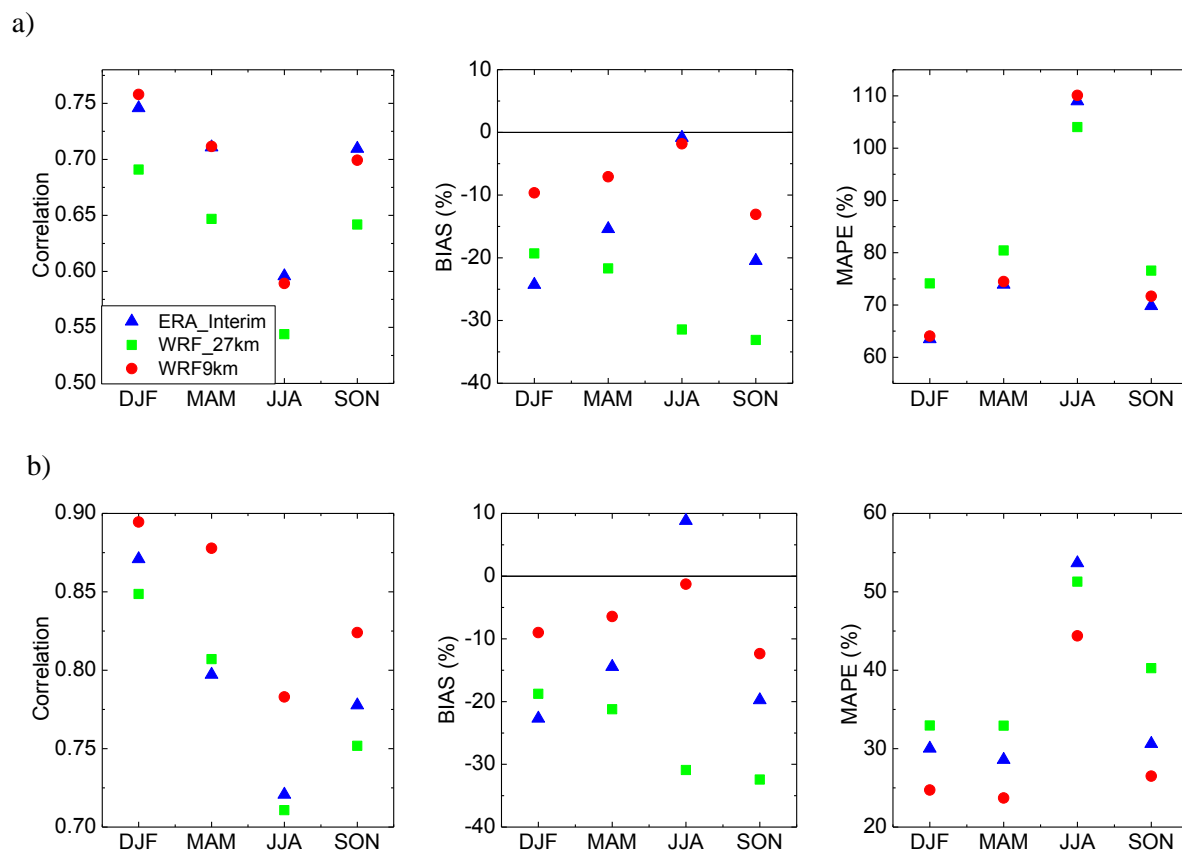


Fig. 34 - Erros sazonais para precipitação (Modelos_v_StaObs): a) acumulação diária; b) acumulação sazonal

Na avaliação dos modelos relativamente à grelha E-OBS das Fig.35-a) e 35-b) observam-se correlações mais altas por parte da ERA-I, e tal facto não é evidente para o WRF. Se a maior resolução não implica melhores correlações, o mesmo não se aplica ao viés normalizado, em que o WRF 9km tem os valores mais baixos, subestimando em 10 % a precipitação diária global no Inverno, e na Primavera apresentando um viés nulo. A ERA-I mostra viés de -15 % e -5 %, respectivamente, para essas estações. Ao contrário da avaliação com as observações locais, o Verão é estação que para além de ter as correlações mais baixas, tem uma grande sobrestimação da precipitação, cerca de 18 % no WRF 9km e ERA-I. NO Outono o WRF 9km e ERA-I têm valores bastante próximos. Na acumulação sazonal a semelhança dos resultados da comparação com estações, a diferença entre WRF 9km e ERA-I aumenta mas de maneira oposta, onde a ERA-I é o modelo com maiores correlações. De novo, tal não implica que este detenha os melhores valores para viés% e MAPE. No Inverno e Primavera o WRF 9km detém os viés % mais baixos.

Estes erros menores são corroborados pelo MAPE, onde para todas as estações o modelo de alta resolução tem os valores mais baixos, com 18 % na Primavera e cerca de 45 % no Verão, e a ERA-I ultrapassa os 50 %. De novo WRF 27km não acrescenta melhorias nesta avaliação sazonal.

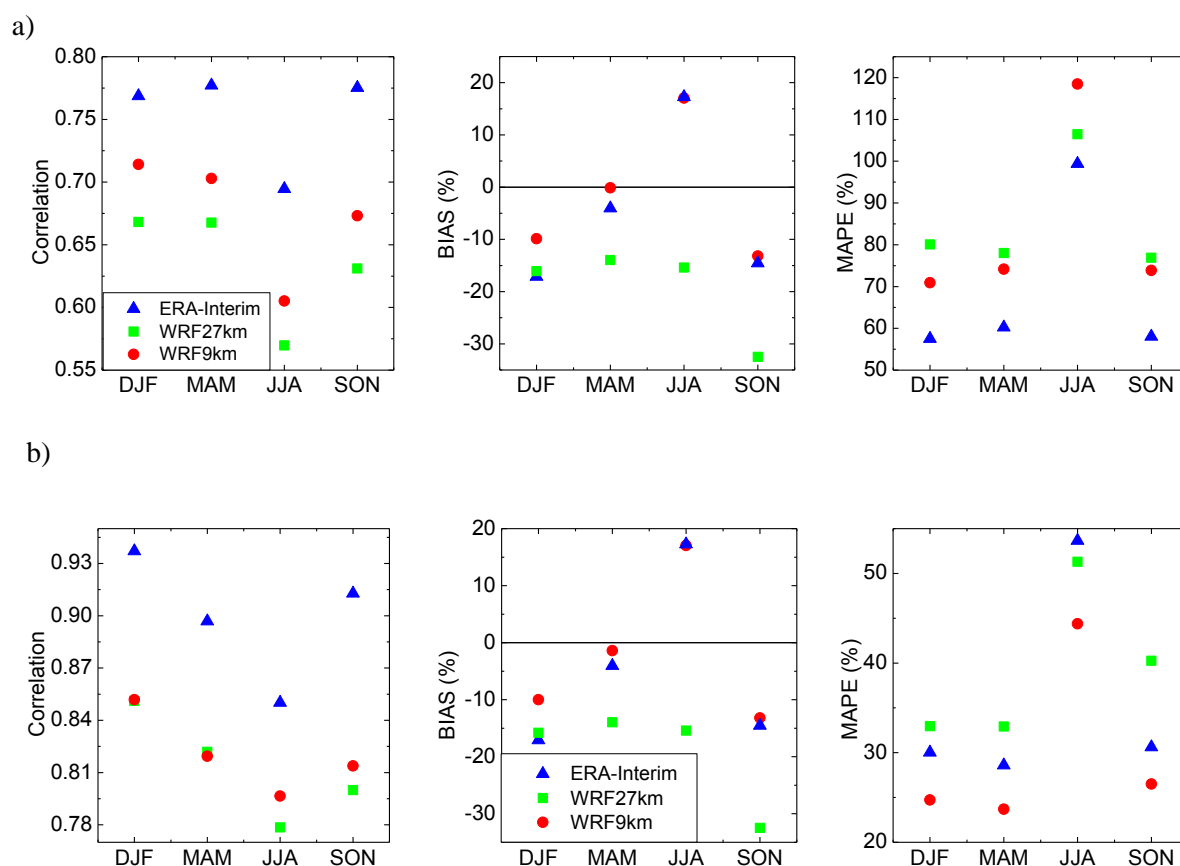


Fig. 35 –Erros sazonais para precipitação (Modelos_v_E-OBS): a) acumulação diária; b) acumulação sazonal

5.1.3.2 Regiões

A Tabela 12 mostra o viés% e o MAPE para a precipitação para as seis regiões, estando assinalados a negrito os valores quando o WRF revela a melhor performance. Na comparação com as estações, podemos verificar que, apesar de numa avaliação global o modelo WRF 27km não mostrar melhorias, o facto é que para algumas regiões especialmente a Norte este supera ERA-I. O modelo WRF 9km representa bem as regiões NW e NE, com viés% muito baixos, especialmente nas estações mais chuvosas, indicando que a precipitação orográfica tem muito boa representação nesta resolução. No Verão, e em especial nas regiões CW e CE o WRF 9km não supera o modelo de forçamento, tal pode indicar, que os processos regionais e convectivos, determinantes na precipitação de Verão, não são adequadamente representados pelo modelo de alta resolução. Esta incapacidade do WRF 9km de representar a precipitação durante o Verão, torna-se ainda evidente ao analisar os valores de MAPE, onde este detém os maiores valores.

Tabela 12 – Erros sazonais (Modelos_v_StaObs) de precipitação diária para as 6 regiões.

Precip		ERA_Interim				WRF_27km				WRF_9km			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Bias (%)	Region												
	NW	-33.2	-28.9	-17.1	-29.1	-12.6	-20.3	-43.6	-29.7	3.0	-2.7	-9.6	-5.3
	NE	-0.8	15.2	40.0	7.0	14.1	10.9	-10.1	-2.3	-7.2	7.9	16.5	1.5
	CW	-21.2	-11.3	-5.9	-18.6	-30.3	-30.0	-32.8	-41.7	-20.1	-17.5	-13.6	-23.8
	CE	-21.6	-7.1	18.1	-20.1	-21.8	-21.4	-13.0	-37.0	-11.5	-1.6	26.9	-15.1
	SW	-27.4	-21.8	2.7	-27.8	-36.6	-38.8	-11.8	-45.2	-21.8	-19.9	4.4	-23.0
	SE	-25.6	-16.2	5.3	-17.9	-34.3	-33.0	-29.1	-41.9	-20.0	-13.3	-3.1	-17.9
MAPE	Region												
	NW	60.8	68.1	94.6	66.7	67.7	74.8	92.0	72.6	61.8	69.0	93.4	67.7
	NE	68.4	83.8	133.7	76.2	91.1	93.0	115.6	86.5	65.3	82.0	126.3	77.9
	CW	61.8	73.8	110.5	68.4	73.8	79.9	107.9	77.8	64.5	74.1	114.4	71.6
	CE	64.2	77.9	126.3	69.2	77.1	82.7	121.6	76.9	62.6	78.1	137.7	70.4
	SW	66.1	75.9	119.7	72.2	74.3	83.0	128.8	75.4	67.7	76.6	136.3	75.7
	SE	70.9	79.8	123.0	79.3	76.9	84.5	114.3	77.8	69.8	82.8	128.5	80.0

Da Tabela 13 faz-se a análise dos erros entre os modelos e E-OBS. Os melhores valores para as duas regiões a Norte observam-se no WRF 9km com valores a NW de -2.8 %, -1.2%, -10.7 % e -10.2 % DJF, MAM, JJA e SON, respectivamente; e -7.2 %, -2.1 %, -1.6 % DJF, MAM e JJA, respectivamente para WRF 27km. Nesta região a ERA-I sobrestima cerca do dobro do WRF 27km. As regiões oeste apresentam uma boa representação por parte do WRF 9km na estação mais chuvosa, com a ERA-I com valores próximos, especialmente no CW, SW e SE. Se o viés% aparece reduzido em todos os modelos, o mesmo não se pode dizer do MAPE, que parece ter só reduzido na comparação com ERA-I. De facto, apesar da ERA-I assentar numa topografia muito suavizada e não captar bem os efeitos regionais, esta parece representar bem a precipitação diária por região e estação do ano, na avaliação com E-OBS.

Tabela 13 – Erros sazonais (Modelos_v_E-OBS) de precipitação diária para as 6 regiões.

Precip		ERA_Interim				WRF_27km				WRF_9km			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Bias (%)	Region												
	NW	-31.6	-21.5	-14.4	-26.5	-15.1	-15.5	-36.9	-32.4	-2.8	-1.2	-10.7	-10.2
	NE	-13.3	4.7	37.7	-5.5	-7.2	-2.1	-1.6	-21.5	-16.4	3.1	31.6	-9.9
	CW	-14.9	-3.9	11.5	-16.6	-26.1	-26.0	-26.7	-42.5	-14.9	-9.5	9.8	-23.3
	CE	-6.0	4.0	33.1	-10.1	-9.2	-14.2	-4.1	-31.9	-0.4	5.1	36.9	-9.1
	SW	-18.9	-6.1	27.4	-18.6	-31.5	-25.7	12.5	-41.6	-16.6	-5.4	39.8	-18.6
	SE	-10.1	2.9	47.0	-9.4	-23.0	-14.8	5.6	-37.9	-11.2	4.1	46.2	-14.3
MAPE	Region												
	NW	60.0	61.8	85.2	62.2	73.1	76.6	90.6	73.3	68.8	72.9	94.2	70.1
	NE	58.7	61.5	103.5	58.6	84.2	85.6	109.7	80.2	68.7	77.9	124.1	74.0
	CW	57.1	56.4	101.1	54.2	79.2	70.4	107.7	75.5	70.6	67.0	119.4	69.0
	CE	55.6	56.1	109.9	52.6	85.6	73.3	117.3	78.4	75.4	74.5	135.5	77.0
	SW	56.9	64.1	113.6	61.1	77.5	77.1	140.5	74.2	72.9	72.8	164.4	78.3
	SE	52.4	62.6	123.0	59.6	81.8	80.6	130.2	79.0	73.9	78.9	158.3	82.0

Após a análise sazonal por região, efectua-se agora a análise do ciclo anual de precipitação mensal nas seis regiões. A NW apesar dos seus viés% reduzidos (da Tabela 12), a ERA-I não parece estar de acordo com as observações, demonstrando grande subestimação, ao contrário do WRF 9km que demonstra uma aproximação assaz rigorosa ao longo de todo o ano. Em todas as regiões à excepção do NE é visível a subestimação dos modelos em relação às observações especialmente nos meses de Inverno por parte da ERA-I e WRF 27km. No CW, no entanto, os modelos demonstram uma clara subestimação entre Outubro e Junho, recuperando bem nos meses Verão. No Outono, todos os modelos têm uma grande subestimação, mas de facto, o WRF 9km é o que mais se aproxima da realidade, trazendo melhorias significativas ao modelo de forçamento.

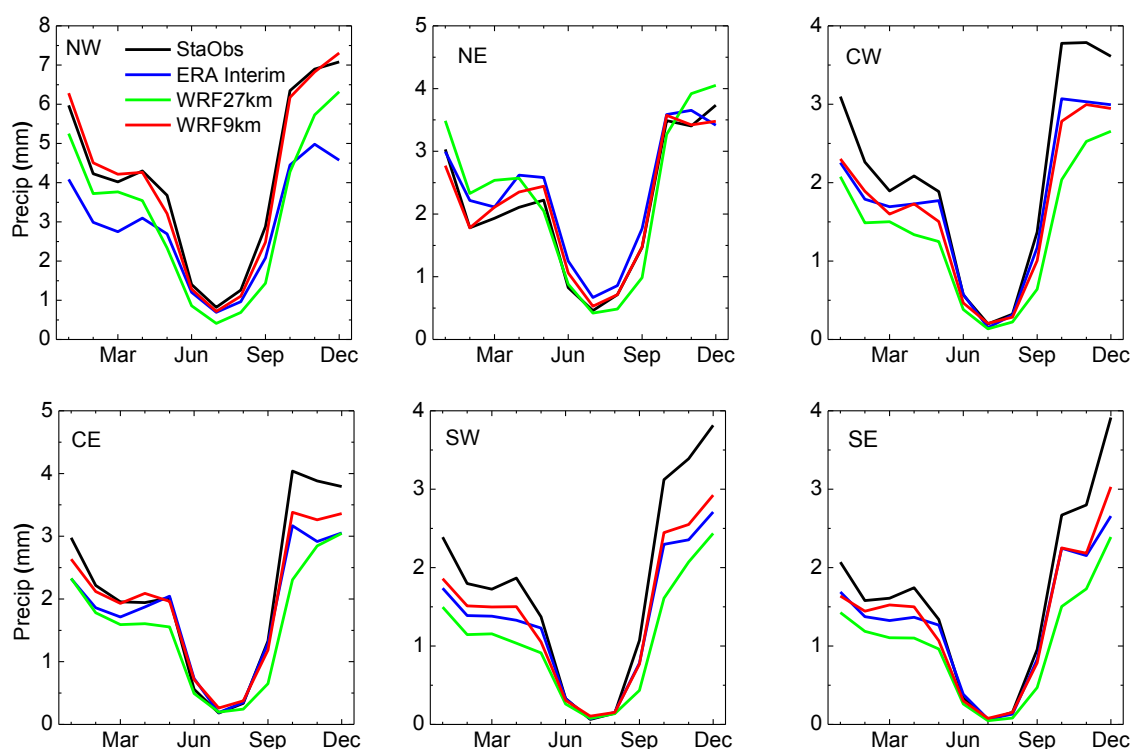


Fig. 36 – Ciclo anual das médias mensais para os 20 anos de precipitação média diária (Modelos e Observações locais). As barras dizem respeito a $1-\sigma$.

Na precipitação mensal dos modelos e de E-OBS, presente na Fig.37, demonstra-se mais uma vez a capacidade do modelo de alta resolução na simulação de precipitação regional. Apesar de uma melhoria aparente na performance da ERA-I, esta mesmo assim não consegue representar a precipitação a NW. A NE esta muda de sinal nos meses de Outono e Inverno, passando a subestimar as observações. Mais impressionante é a proximidade no CW de ERA-I e E-OBS, melhor que o modelo WRF 9km. Numa visão global, continua a existir subestimação por parte dos modelos, contudo pouco pronunciada especialmente nos meses de Verão onde existe uma maior proximidade à curva de observações. O modelo WRF 9km mantém assim a sua aproximação à realidade da grelha regular na resolução de processos à escala regional, e este continua a ser um bom modelo de simulação regional de precipitação.

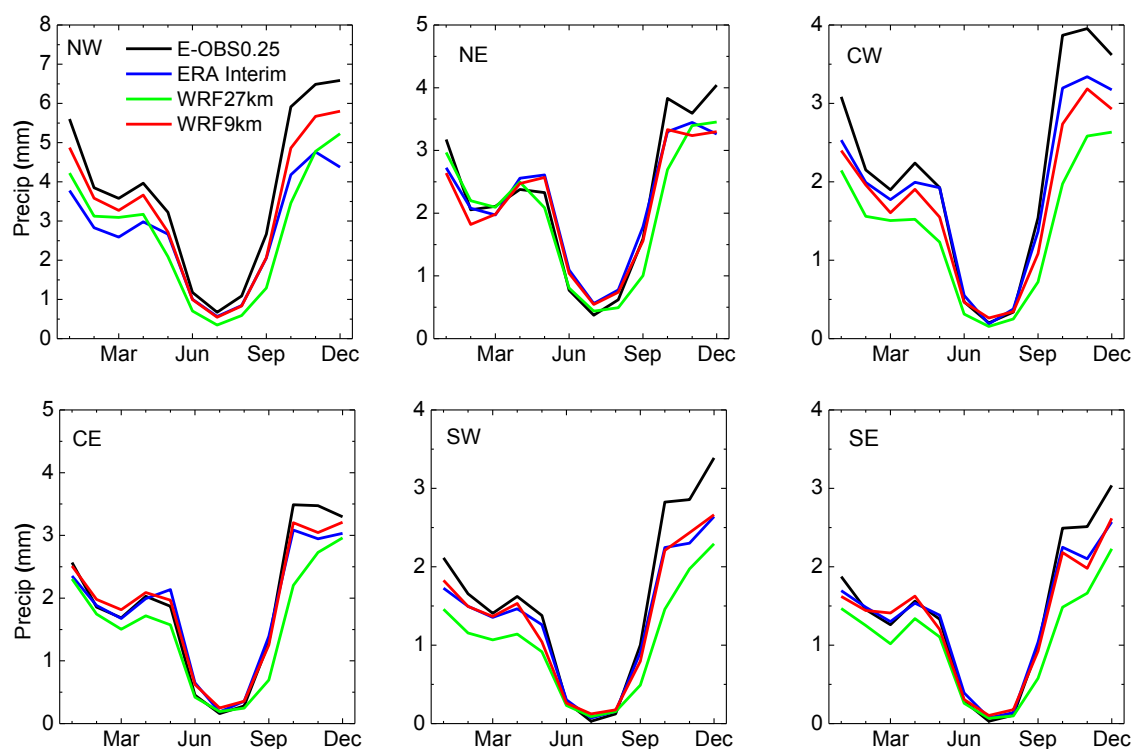


Fig. 38 Ciclo anual das médias mensais para os 20 anos de precipitação média diária (Modelos e E-OBS). As barras dizem respeito a $1-\sigma$.

Para quantificar e caracterizar estes eventos de intensa precipitação, procede-se análise das distribuições de eventos de precipitação e quantis.

5.1.3.3 Histogramas e extremos

A relevância crescente na simulação de eventos extremos a nível regional, deve-se ao facto de estes estarem relacionados com cheias ou secas. Daí a importância dos modelos virem a ser capazes de simular a frequência destes eventos de forma assaz rigorosa. E por isso uma avaliação dos modelos na representação destes eventos é fundamental para perceber o que ainda falta realizar em termos de parametrizações ou resolução dos RCMs.

A análise dos eventos extremos de precipitação é efectuada através dos histogramas apresentados na Fig.39. As frequências relativas estão em escala logarítmica para que a distribuição de eventos seja perceptível. Foram calculadas as frequências relativas (em relação ao número total de eventos) de eventos com precipitação diária acima de 0.1 mm no intervalo de 0 a 300 mm com 1 mm de incremento. Numa primeira visão verifica-se a correspondência na frequência de eventos entre as observações e o modelo WRF, em todas as estações do ano, indicando uma melhoria substancial em relação à ERA-I. Esta última não é capaz de simular os eventos de precipitação mais elevada, com a maioria da sua frequência em eventos menos intensos. A análise do gráfico respeitante ao Inverno, permite-nos confirmar que a ERA-I não gera mais do que 80 mm por dia, não atingindo os 270 mm/dia patentes nas observações, e que o modelo WRF 9km representa com bastante acuidade.

Este efeito não é tão marcado na estação de Verão por ser uma estação seca, ainda assim a ERA-I simula eventos de muito pouca precipitação nesta estação. No Outono verifica-se a dificuldade dos modelos em simular eventos de elevada taxa de precipitação. Nesta estação do ano as observações locais denotam um extremo de precipitação diária que ronda os 290 mm, este evento não é descrito por nenhum modelo, se bem que o WRF 9km é o que mais se aproxima globalmente dos eventos com mais precipitação, e a ERA-I nunca vai para além dos 90 mm.

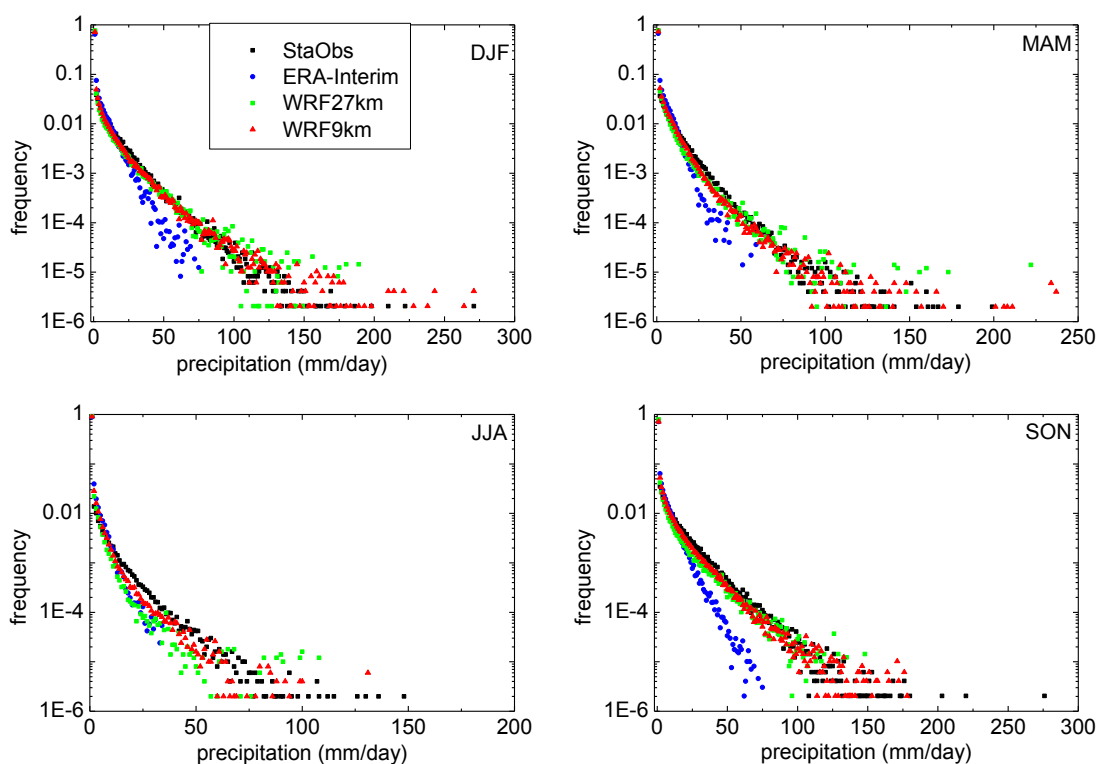


Fig. 39 – Histogramas sazonais para os 20 anos de precipitação diária (> 0.1 mm) (Modelos e StaObs)

Para a avaliação com a grelha E-OBS (Fig. 40), é necessário ter em mente o comportamento dos eventos analisados anteriormente com as observações locais. Tal necessidade advém da incerteza associada à qualidade das grelhas de observação, nos seus métodos de interpolação e na quantidade de estações utilizadas para a sua construção. Para Portugal só 26 estações foram utilizadas para a interpolação. A informação contida nos resultados com observações locais no que diz respeito a esta avaliação tem a ver com cerca de 300 estações. Assim sendo, a avaliação efectuada com as observações locais tem mais relevância. Todavia, tem-se realizado a validação dos modelos com a grelha E-OBS para Portugal Continental, o que resulta em distribuições de eventos de precipitação diferentes da realidade verificada nas observações locais.

Estes histogramas ilustram bem a marcada suavização dos dados de elevada precipitação diária, neste caso a redução de eventos acima de 100 - 150 mm/dia. Este é um bom exemplo em como as grelhas de observação subestimam os eventos extremos de precipitação o que corrobora a fragilidade da comparação entre modelos e esta grelha de observação, e aponta para a necessidade de grelhas baseadas em um maior número de estações observacionais. Importa ainda referir, que seria importante efectuar estudos onde se quantificasse com rigor a subestimação de máximos de precipitação por parte das grelhas de observação em relação à precipitação, estudo esse que não foi feito para este trabalho.

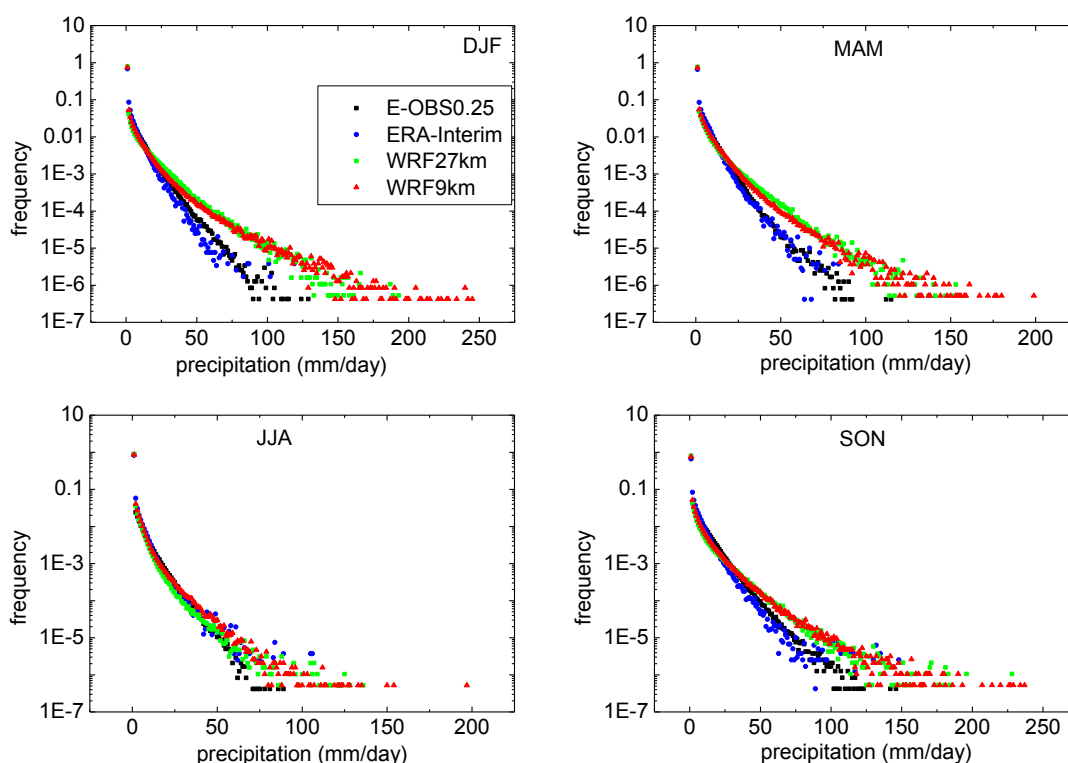


Fig. 40 – Histogramas sazonais para os 20 anos de precipitação diária (> 0.1 mm) (Modelos e E-OBS)

Para consolidar a informação em relação aos eventos extremos contida na Fig.39, as Fig.41 e 42 apresentam os quantis sazonais de precipitação diária para os 20 anos de simulação em comparação com as observações, respectivamente, locais e da grelha. Para a precipitação o intervalo de quantis foi: 2.5,10,20,25,30,40,50,60,70,75,80,90,95,97.5,99 e 99.9. A figura denota no Inverno uma simulação bastante rigorosa do modelo WRF para os quantis calculados das observações locais, especialmente nos quantis mais elevados com uma ligeira sobrestimação do último quantil. De notar, é a capacidade do mesmo em simular o quantil mais elevado nas estações da Primavera e Outono.

Em todas as estações a ERA-I só representa os primeiros quantis das observações em concordância com a informação dada pelos histogramas da Fig. 39. Para os quantis mais elevados esta perde claramente capacidade de representação, em que o WRF apresenta melhorias significativas, mesmo no Verão, em que estas são menos importantes.

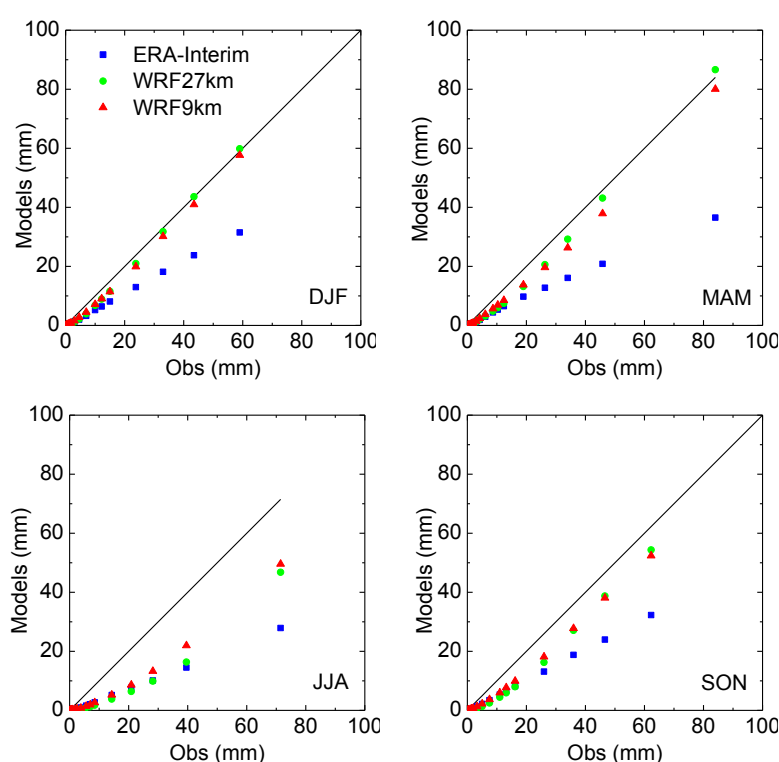
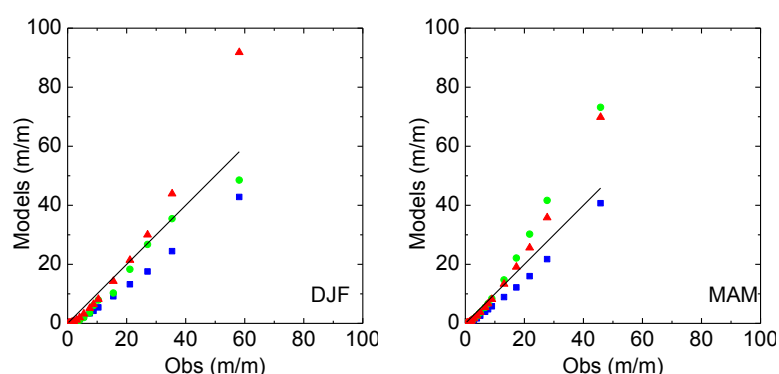


Fig. 41 – Quantis (2.5,10,20,25,30,40,50,60,70,75,80,90,95,97.5,99 e 99.9) sazonal de precipitação diária acumulada para os 20 anos (Modelos e Observações locais)



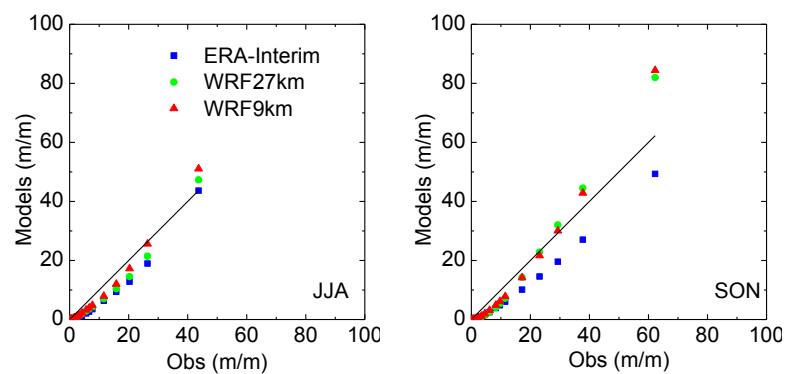


Fig. 42 – Quantis (2.5,10,20,25,30,40,50,60,70,75,80,90,95,97.5,99 e 99.9) sazonais de precipitação diária acumulada para os 20 anos (Modelos e E-OBS)

6. Conclusões

Este trabalho versou sobre uma exaustiva avaliação do modelo regional de alta resolução WRF, em modo de clima, quanto à sua capacidade em representar as variáveis de: temperatura máxima, temperatura mínima, vento e precipitação para Portugal Continental. Esta avaliação foi realizada comparando os resultados de dois domínios, de 9 e 27 km, modelo com observações locais e observações da grelha regular E-OBS, para o período de 20 anos de simulação (1989 – 2008). De modo a melhor compreender o valor da simulação de alta resolução esta avaliação também foi efectuada para as mesmas variáveis resultado do modelo de forçamento de larga escala, a ERA-Interim. A análise focou-se nas escalas temporais de um dia, cinco dias, mensal e sazonal, para todo o domínio espacial e para a divisão deste em seis regiões.

Para a variável Tmax o modelo WRF denota as correlações mais elevadas e as medidas de erro mais reduzidas, quando comparado com as estações locais para todos os intervalos temporais e para todo o domínio espacial. O viés negativo global de -1.1 °C verificado para a ERA-I nesta comparação, é fortemente melhorado para 0.1 °C no domínio WRF 9km. Esta redução/correção do viés negativo do modelo de forçamento é também observada para as quatro estações do ano, com menos ênfase no Inverno, onde a ERA-I apresenta um viés mais baixo em comparação com as outras estações do ano. A nível regional o modelo WRF demonstra o seu bom desempenho na representação do ciclo anual das médias mensais de Tmax, mostrando a sua proximidade às observações locais ao longo de todo ano, o que é corroborado também pela correlação mensal registada de 0.99. Para as seis regiões nas quatro estações do ano, o modelo WRF apresenta o viés e RMSE mais baixos, sendo nulos em algumas regiões. O modelo WRF mostra assim um bom desempenho especialmente nas regiões a oeste, estas que são influenciadas pelo efeito amenizador da brisa marítima ao longo da costa. Importa ainda referir o notável desempenho do modelo WRF na representação de valores extremos de temperatura máxima e da sua frequência, propriedades que o modelo de reanálise mostra dificuldade em reproduzir em todas as estações do ano.

Da avaliação para Tmin verificam-se coeficientes de correlação elevados entre o modelo WRF e as observações locais, embora não tão elevados como em Tmax. Estas diferenças do desempenho do modelo entre Tmax e Tmin podem estar associadas a falhas nas parametrizações de camada limite, nomeadamente na representação do arrefecimento nocturno em camada limite estável (Zhang *et al.*, 2009), influenciando deste modo a simulação de Tmin. Todavia, o modelo WRF é o que apresenta os melhores resultados quando comparada com a ERA-I. O sinal positivo de viés denotado pela ERA-I, de valor igual a 0.5 °C, para todo o domínio temporal e espacial, é agora reduzido para -0.2 °C pelo modelo WRF 27km. Na avaliação sazonal, este sinal é reduzido com especial ênfase nas estações de Verão e Outono, sendo que no Inverno e na Primavera o domínio de 27km é o que demonstra o viés menor. Numa análise regional, no que diz respeito ao ciclo anual das temperaturas mínimas mensais, o domínio WRF 9km é que mais se aproxima das observações locais, indo de encontro ao valor do coeficiente de correlação mensal de 0.95 da avaliação global. Ainda na avaliação regional, ambos os domínios WRF demonstram os erros mais baixos, em que o WRF 9km é o que apresenta os melhores resultados em todas as regiões e estações do ano.

Na quantificação de valores extremos e frequências de Tmin, o modelo WRF demonstra muito bom desempenho, em especial nas temperaturas mínimas mais baixas. Em todas as estações do ano, o modelo WRF corrige o desfasamento da distribuição de Tmin em todo o intervalo de temperatura.

Os coeficientes de correlação para a variável de precipitação entre o modelo WRF e observações locais, denotam valores mais baixos dos registados para Tmax e Tmin. Porém, estes aumentam significativamente com o domínio temporal, em que o WRF 9km apresenta os melhores valores, de 0.72 a 0.89, de um dia a mensal, respectivamente. A avaliação global da ERA-I verifica para um dia valores de correlação e medidas de erros muito próximos do domínio WRF 9km. Na agregação sazonal, o WRF 9km mostra as correlações mais elevadas, sendo a mais alta durante o Inverno. O WRF 9km regista um viés% muito baixo na estação do Inverno e quase nulo durante o Verão. A diferença entre ERA-I e WRF 9km torna-se mais proeminente na acumulação sazonal, visto que o WRF 9km mostra as correlações mais elevadas e os erros mais reduzidos, em todas as estações do ano. Na avaliação regional, o domínio WRF 9km exibe uma boa representação da precipitação em todas as regiões, especialmente nas regiões de forte precipitação a Norte, apresentado um viés% mais baixo que a ERA-I. Além do viés%, o WRF 9km detém os valores mais reduzidos do MAPE nas estações do ano mais chuvosas, nomeadamente no Inverno e Outono, em todas as regiões. Na distribuição de frequências de precipitação diária para as quatro estações, o modelo WRF revela uma notável aproximação à distribuição de frequências observadas das estações locais, em todo o intervalo de precipitação. O WRF 9km demonstra ainda o seu muito melhor desempenho na representação de valores de extrema precipitação, quando comparado com o modelo de forçamento.

A avaliação global da intensidade do vento na comparação com as estações locais, demonstra a capacidade de representação da intensidade do vento do modelo WRF nas regiões costeiras. Tal pode também indicar uma boa representação da circulação de brisa dominante na estação de Verão, característica do clima português. O modelo WRF apresenta no interior sobrestimações significativas. O viés global do WRF tem o valor de 2.2 m/s em todos os domínios temporais, e a ERA-I regista valores de 1.0 m/s. Todavia, o domínio WRF 9km apresenta o coeficiente de correlação mais elevado a um dia, de 0.49, e um desvio padrão normalizado, de 1.0, indicando uma capacidade razoável do modelo em representar a variabilidade desta variável à escala temporal de um dia.

A comparação dos modelos com a grelha regular E-OBS foi realizada para todas as variáveis, excepto o vento. Esta avaliação evidencia bons resultados para os modelos, sendo que nesta comparação a ERA-I demonstra genericamente os melhores resultados, especialmente para as variáveis Tmax e Tmin. No entanto, deve referir-se que grelha E-OBS foi baseada unicamente em 26 estações observacionais, e não parece caracterizar a heterogeneidade espacial destas variáveis no território. Esta fragilidade reflecte-se em toda a avaliação global e sazonal de Tmax e Tmin. Em muitas regiões em que o WRF apresentava os melhores resultados na comparação com as estações locais são agora regiões onde este apresenta os piores resultados, quando comparados com a ERA-I. Esta propriedade é ainda mais visível para Tmin, em que os melhores resultados das medidas de erro se verificam para a ERA-I. No caso da precipitação a característica mais importante a salientar é a suavização de E-OBS de eventos extremos quando comparados com as observações locais, sendo a avaliação de extremos com a grelha regular E-OBS para precipitação muito menos interessante do que a realizada com as estações locais. Porém, o WRF continua a mostrar uma maior qualidade na descrição dos extremos da grelha E-OBS.

Os resultados apresentados demonstram a potencialidade do modelo WRF na caracterização climática de Portugal, nomeadamente na distribuição espacial heterogénea dos campos médios das variáveis em estudo, e na representação de efeitos como as circulações costeiras e as associadas a topografia complexa. A avaliação evidencia melhorias significativas em relação ao modelo de forçamento de larga escala na representação de observações pontuais, indicando que o *downscaling* da reanálise é um processo que apresenta claramente mais valia na simulação do clima, em particular quando se utiliza a alta resolução (9 km). Estes resultados estão em concordância com estudos recentes, em diversas regiões do globo, nomeadamente na Noruega (Barstad *et al.*, 2009; Heikkilla *et al.*, 2010), na Califórnia (Caldwell *et al.*, 2009), no Pacífico Noroeste (Zhang *et al.*, 2009) e no Atlântico Norte (Winterfeldt and Weisse, 2009).

Em conclusão, o modelo WRF é sem dúvida uma boa aposta para a simulação regional de clima, bem como para a construção de uma base de dados climatológica em Portugal Continental para as variáveis de temperatura máxima, mínima e precipitação.

7.Referências

- Alexandru A, de Elia R, Laprise R, Separovic L, Biner S (2008) Sensitivity study of regional climate model simulations to largescale nudging parameters. *Mon Wea Rev* 137:1666–1686. doi:10.1175/2008MWR2620.1
- Barstad I, Sorteberg A, Flatøy F, Déqué M (2009) Precipitation, temperature and wind in Norway: dynamical downscaling of ERA40. *Clim Dyn* 33:769–776. doi:10.1007/s00382-1030 008-0476-5.
- Berrisford P., Dee, Fielding D., Fuentes K., Kallberg M., Kobayashi P., Uppala S. 2009. *The ERA-Interim Archive*. ERA Report Series. 1. Technical Report. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading.
- Betts A.K. 1986. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**. 677-691.
- Betts A.K, Miller M.J. 1986. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**. 693-709.
- Caldwell P., Chin H.-N.S., Bader D.C., Bala G. 2009. Evaluation of a WRF dynamical downscaling simulation over California. *Clim. Change*, Springer, **95**. 499-521.
- Cardoso, R.M., P.M.M. Soares; J. de Medeiros; P.M.A. Miranda and M. Belo-Pereira, 2011: "Assessment of the performance and added value of a WRF high resolution climate simulation for Iberian Peninsula Precipitation". Submitted to International Journal Of Climatology.
- Collins, W. D., and Coauthors, 2004: Description of the NCAR Community Atmospheric Model (CAM 3.0). NCAR Tech. Note, NCAR/TN-4641STR, 226 pp.
- Christensen J., Christensen O. 2007. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, **81**. 7-30.
- Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M., Amanatidis G. 2007. Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project. *Clim. Change*, **81**. 1-6. DOI:10.1007/s10584-006-9211-6.
- Di Luca, A., R. De Elia, R. Laprise, 2011: *Potential for added value in precipitation simulated by high resolution nested Regional Climate Models and Observations*. *Clim. Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-011-1160-8.
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grummann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational Mesoscale Eta Model. *J. Geophys. Res.*, 108, 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Giorgi F., Mearns L.O. 1991. Approaches to regional climate change simulation: A review. *Rev. of Geophys.*, **29**. 191-216.
- Giorgi F. 2002. Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: Observations. *Clim. Dyn.*, **18**. 675-691. DOI: 10.1007/s00382-722 001-0204-x
- Haylock M., Hofstra N., Klein-Tank A., Klok E.J., Jones P., New M. 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006, *J. Geophys. Res.*, **113**, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.

- Heikkilä U., Sandvik A., Sorterberg A. 2010. Dynamical Downscaling of ERA-40 in complex terrain using WRF regional Climate model. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-010-0928-6 .
- Hong S.-Y., Lim J.-O. J. 2006: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**. 129-151.
- Hofstra N., Haylock M., New M., Jones P.D., 2009a. Testing E-OBS European high-resolution gridded dataset of daily precipitation and surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2009JD011799.
- Hofstra N., New M., McSweeney C., 2009b. The influence of interpolation and station network density on the distribution and extreme trends of climate variables in gridded data. *Climate Dynamics*, in press.
- Janjic, Z.I. 1990. The step-mountain coordinate: physical package. *Mon. Wea. Rev.*, **118**. 1429-1443.
- Janjic Z.I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**. 927-945.
- Janjic Z.I. 2000. Comments on "Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models. *J. Atmos. Sci.*, **57**. 3686.
- Janjic Z.I. 2001. Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso Model. *NCEP Office Note* 437, 61 pp.
- Kallberg P., Simmons A., Uppala S., Fuentes M. 2004. 'The ERA-40 archive'. ECMWF ERA-40 Project Report Series, No. 17. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield, Reading, UK (available from www.ecmwf.int/publications)
- Kalnay E. and Coauthors, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**. 437–471.
- Kallberg, P., Simmons, A., Uppala, S. and Fuentes, M. 2004 'The ERA-40 archive'. ECMWF ERA-40 Project Report Series, No. 17. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield, Reading, UK (available from www.ecmwf.int/publications).
- Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.*, **22**. 1441-1453.
- Kjellström E., Boberg F., Castro M., Christensen H.J., Nikulin G., Sánchez E. 2010. Daily and monthly temperature and precipitation statistics as performance indicators for regional climate models. *Clim. Res.*, **44**. 135-150.
- Klok, E.J., Klein Tank A. M. G. 2009. Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int. J. Climatol.*, **29**. 1182–1191, doi:10.1002/joc.1779.
- Laprise R. 2008. Regional climate modeling. *J. Comput. Phys.*, **227**. 3641–3666, doi:10.1016/j.jcp.2006.10.024.
- Leung L. R., Mearns L. O., Giorgi F., Wilby R. L. 2003. Regional climate research: Needs and opportunities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **84**. 89-95. doi:10.1175/BAMS-84-1- 89.
- Leung, L. R., Qian Y. 2009. Atmospheric rivers induced heavy precipitation and flooding in the western U.S. simulated by the WRF regional climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **36**. L03820, doi:10.1029/2008GL036445.

Miranda, P.M.A., M.A. Valente, A.R. Tomé, R. Trigo, M. F. Coelho, A. Aguiar, E.B. Azevedo, O clima de Portugal nos séculos XX e XXI, in Santos e Miranda (eds), 2006, 47-113), Gradiva.

Miranda, P.M.A., F. Coelho, A. R. Tomé, M. A Valente., A. Carvalho, C. Pires, H. O. Pires, V. C. Cabrinha and C. Ramalho (2002) "20th Century Portuguese Climate and Climate Scenarios", in Santos, F.D., K Forbes and R. Moita (eds) *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adptation Measures*", 27-83. Gradiva.

Mitchell TD, Jones PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol* 25:-693–712

Palmer T.N., Doblas-Reyes F.J., Weisheimer A., Rodwell M.J. 2008. Toward seamless prediction: Calibration of climate change projections using seasonal forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89. 459 - 470.

Soares, P.M.M., R.M. Cardoso, J. de Medeiros, P.M.A. Miranda, M. Belo-Pereira and F. Espirito-Santo, 2011: "High Resolution Dynamical Downscaling of ERA-Interim for Portugal". Submitted to *Climate Dynamics*.

Soares, P.M.M., R.M. Cardoso, J. de Medeiros; P.M.A. Miranda and M. Belo-Pereira, 2011: "ENSEMBLES Regional Climate Models ability to represent the precipitation over Portugal". Submitted to *Journal of Geophysical Research*.

Sotillo, M., Ratsimandresy, A., Carretero, J., Bentamy, A., Valero, F., and Gonzalez-Rouco, F. (2005). A high-resolution 44-year atmospheric hindcast for the Mediterranean Basin: Contribution to the regional improvement of global reanalysis. *Climate Dyn.* 25, 219–236

Qian Y, Ghan S.J., Leung L.R. 2009. Downscaling hydroclimatic changes over the Western U.S. Based on CAM subgrid scheme and WRF regional climate simulations. *Inter. J. Climatol*, 30(5). 675-693. doi:10.1002/joc.1928

Rauscher S.A., Coppola E., Piani C., Giorgi F. 2010: Resolution effect of regional climate model simulation of precipitation over Europe. Part I: Seasonal. *Clim. Dyn*, 35: 685-711. doi: 10.1007/s00382-009-0607-7.

Salathé E.P., Steed R., Mass C.F., Zahn P.H. 2008. A high-resolution climate model for the United States Pacific Northwest: Mesoscale feedbacks and local responses to climate change. *J. Climate*, 21. 5708–5726.

Skamarock, W.C. and Coauthors 2008. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note TN-475_STR, 113 pp.

SNIRH: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, 2010. <http://snirh.pt/> 808

Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., M. Tignor, Miller H. 2007. *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, 996 pp.

Stein U., Alpert P. 1993: Factor separation in numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2107–2115.

Sillman J., Roeckner R. 2008. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climate Change*, 86. 83–104. doi:10.1007/s10584-007-9308-6.

van der Linden P, Mitchell J.F.B. 2009. ENSEMBLES: Climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter

Stein, U., and P. Alpert, 1993: Factor separation in numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2107–2115.

Winterfeldt, Jörg, Ralf Weisse, 2009: Assessment of Value Added for Surface Marine Wind Speed Obtained from Two Regional Climate Models. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 2955–2965. doi: 10.1175/2009MWR2704.1

Zhang, Y, V Dulière, P Mote, E.P. Salathé Jr., 2009: Evaluation of WRF and HadRM Mesoscale Climate Simulations over the United States Pacific Northwest. *J. Climate*, 22, 5511-5526.

ANEXO

ANEXO

Valor acrescentado do modelo regional de alta resolução para a simulação de precipitação

Este apêndice pretende ilustrar uma metodologia para caracterização do valor do modelo WRF em relação ao modelo forçador para a simulação da precipitação em Portugal. Neste trabalho preliminar seguiu-se os trabalhos de Di Luca *et al.* (2011) na quantificação do valor acrescentado dos RCMs de alta resolução em relação aos modelos de forçamento de larga escala, em que se estabelece uma condição necessária para algumas quantidades estatísticas, de modo a que o *downscaling* do modelo de forçamento para domínios de alta resolução sugira um valor acrescentado significativo. Uma das motivações deste estudo tem que ver com a exploração da variabilidade espacial que certas quantidades estatísticas climáticas (quantis, médias, variâncias, etc) evidenciam nos modelos de alta resolução, que não estão presentes em grelhas de mais baixa resolução.

O valor acrescentado pelos RCMs apresenta uma dependência duma variedade de factores. Um dos factores essenciais é a variável climática em estudo e em que medida o valor acrescentado depende da escala temporal e espacial da mesma. De maneira análoga a Di Luca *et al.* (2011) escolheu-se a variável precipitação por ser uma variável que exhibe um grande intervalo de escalas espaciais e temporais, e por isto é considerada uma variável que tende a maximizar o valor acrescentado potencial (PAV a partir daqui) (Bresson and Laprise, 2009). O termo potencial advém do facto de nem sempre as resoluções mais altas encerrarem resultados com valor acrescentado. Um exemplo disto será um modelo de alta resolução cujas distribuições e intensidades das variáveis simuladas pouco se assemelhem à realidade observada.

Neste anexo são apresentadas medidas simples de quantificação do PAV propostas originalmente por Di Luca *et al.* (2011). O PAV é calculado para o campo da precipitação, simulada por RCMs e GCMs e em comparação com observações em grelhas regulares e em estações locais. Uma vez que nesta análise se privilegiam a variabilidade e os extremos de precipitação a realidade de referência é dada pelas observações locais. Na medida em que quanto mais os PAVs dos modelos se aproximarem do PAV calculado com as estações locais, mais significativo será o valor acrescentado dos mesmos, e mais significativas serão as melhorias que estes trazem em relação aos modelos de forçamento.

Para o cálculo de PAV escolheram-se as escalas temporais de um dia e quinze dias; para as regiões escolheram-se as seis regiões já analisadas e também caixas – ou *grid boxes* – cujos centros são os pontos da grelha da ERA-I. Estas num alinhamento longitudinal ($-8.8 \leq \text{LON} \leq -7.4$) cobrindo a variação latitudinal de Portugal Continental ($37.1^\circ \leq \text{LAT} \leq 42^\circ$). A primeira divisão permite-nos uma análise geográfica simplificada e a segunda uma avaliação mais detalhada e centrada no confronto entre modelos.

Para a análise sazonal foram escolhidas a estação de Inverno (com maioritariamente precipitação orográfica e estratiforme) e a estação de Verão (com precipitação convectiva de larga escala). Os domínios de alta resolução são WRF 9km e WRF 27km, as grelhas de observação são E-OBS e IB0.2 para Portugal Continental, e as estações locais são as do IM_INAG. Ambos os domínios do WRF e observações são comparados com a ERA-I.

Para o cálculo dos PAVs foi escolhida a quantidade estatística para a análise de extremos: percentil 95 (p95).

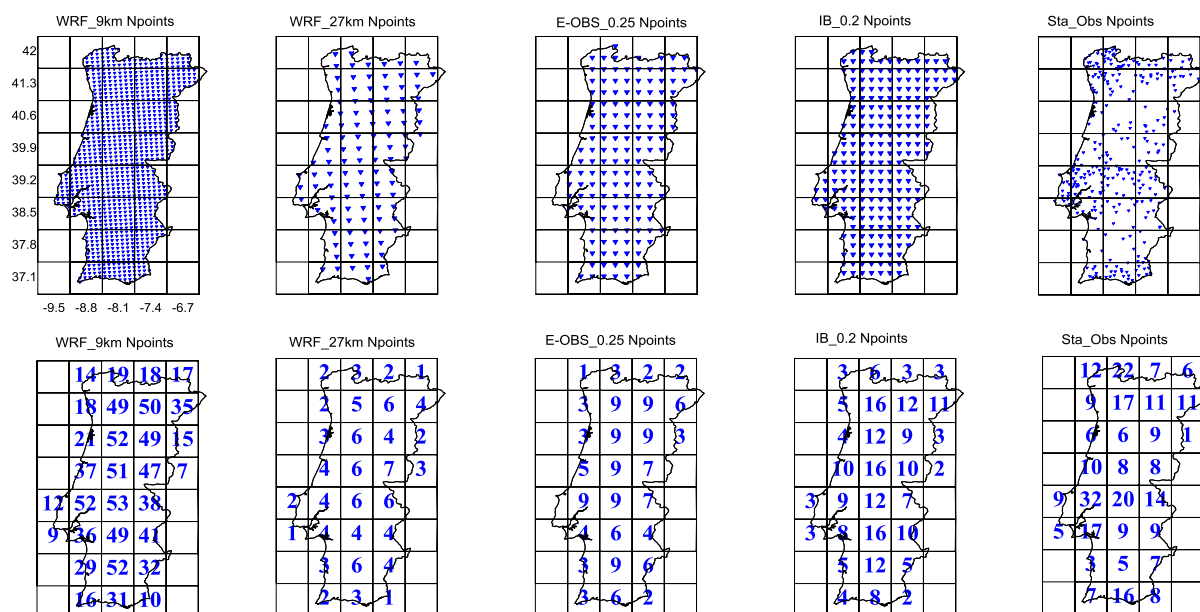


Fig. A1 – Número de pontos de cada domínio, grelhas de observação e estações locais por caixa da ERA-I : WRF 9km, WRF 27km, E-OBS, IB0.2 e estações IM_INAG

Formulação

Formulam-se quatro quantidades para o cálculo dos PAVs: Max PAV, Mean PAV, Max rPAV e Mean rPAV.

- Mean PAV e Mean rPAV:

Calcula-se o percentil 95 para cada caixa ou região, tendo em conta o número de pontos de cada grelha e estações da região, ou caixa, no respectivo intervalo temporal. Obtém-se assim o p95 para cada domínio de maior resolução a que chamaremos p95_hres. O mesmo cálculo é feito para a ERA-I, e o percentil 95 é denominado p95_lres. A partir daqui define-se o seguinte:

$$\text{Mean PAV} = \text{p95_hres} - \text{p95_lres}$$

e

$$\text{Mean rPAV} = \frac{\text{p95_hres} - \text{p95_lres}}{\text{p95_hres}}$$

- Max PAV e Max rPAV:

Calcula-se o percentil 95 para cada ponto das grelhas ou estações locais, no respectivo intervalo temporal, de cada região ou caixa. Posteriormente calcula-se o percentil 95 máximo de cada caixa ou região. Obtém-se assim o pmax95 de cada domínio de maior resolução a que chamaremos pmax95_hres. O mesmo cálculo é feito para a ERA-I e o percentil 95 máximo é denominado pmax95_lres. A partir daqui define-se o seguinte:

$$\text{Max PAV} = \text{pmax95_hres} - \text{pmax95_lres}$$

e

$$\text{Max rPAV} = \frac{\text{pmax95_hres} - \text{pmax95_lres}}{\text{pmax95_hres}}$$

1Dia

DJF

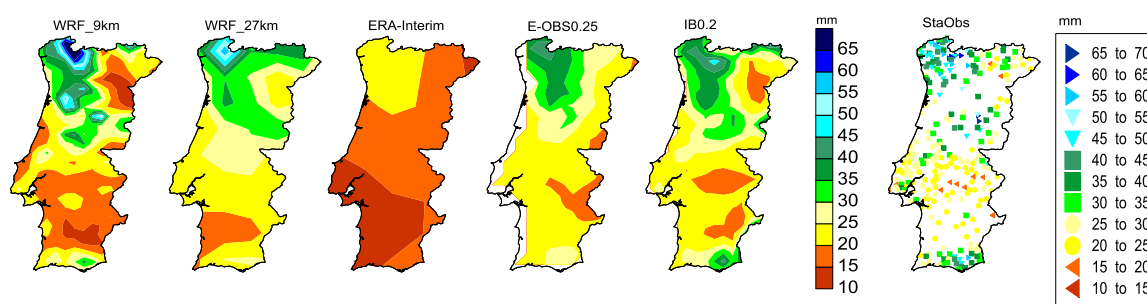
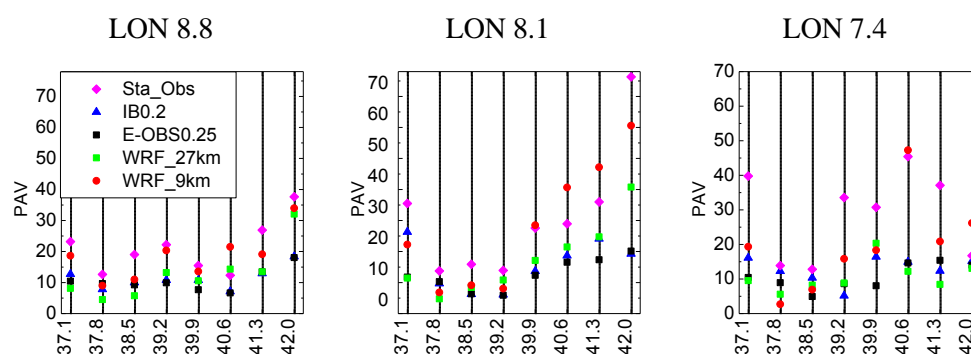


Fig. A2 – Percentil 95 da precipitação diária de Inverno de cada domínio, grelhas de observação e estações: WRF 9km, WRF 27km, E-OBS, IB0.2 e estações IM_INAG

Grid - Boxes

a)



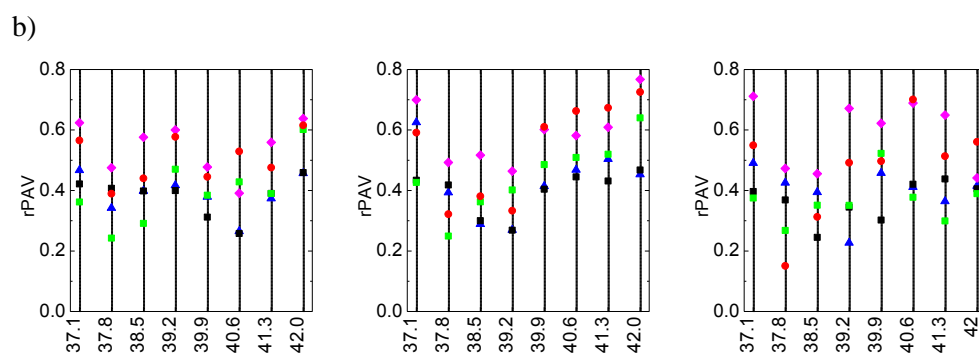


Fig. A3 – PAV e rPAV do máximo de p95 para a precipitação diária de Inverno nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Max PAV; b) Max rPAV

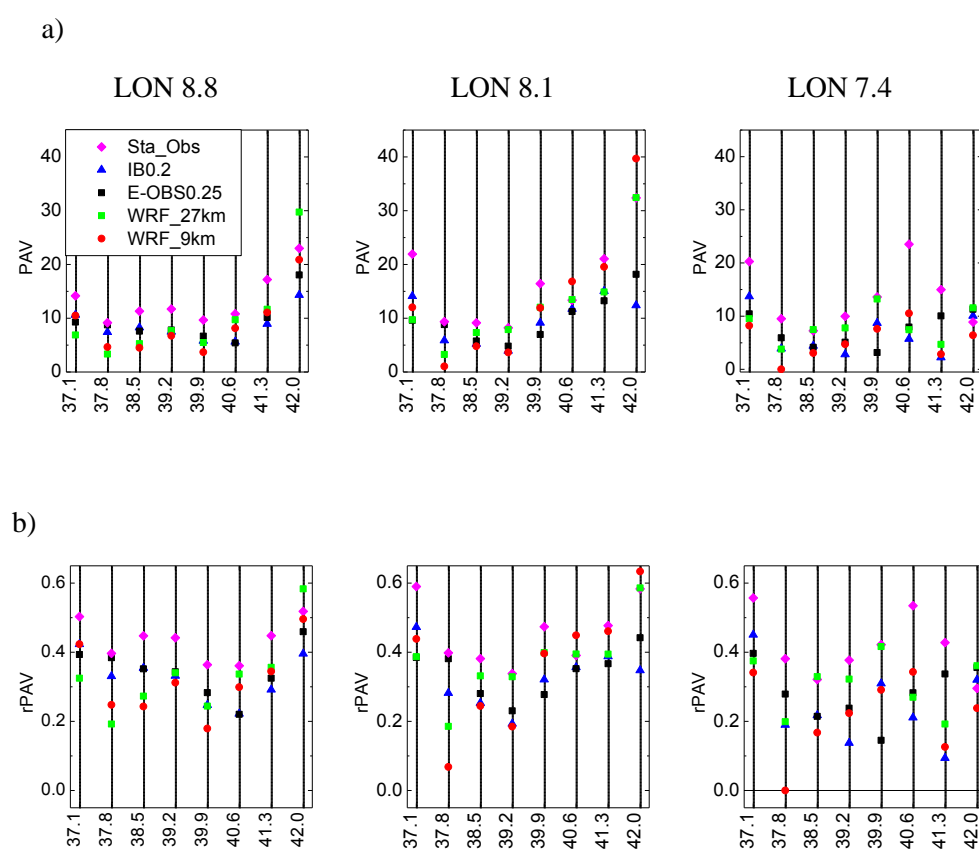


Fig. A4 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação diária de Inverno nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Mean PAV; b) Mean rPAV

Regiões

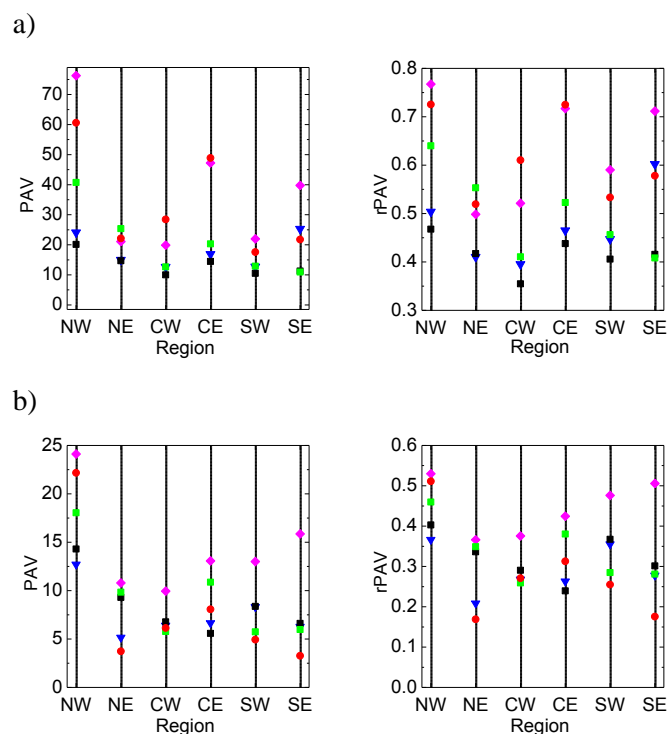


Fig. A5 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação diária de Inverno nas seis regiões. a) Max PAV (à esq.) e Max rPAV (à dir.); b) Mean PAV (à esq.) e Mean rPAV (à dir.)

JJA

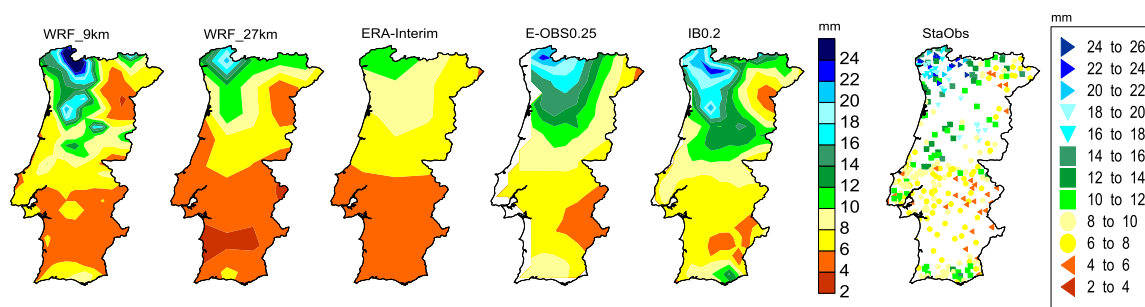


Fig. A6 – Percentil 95 da precipitação diária de Verão de cada domínio, grelhas de observação e estações locais: WRF 9km, WRF 27km, E-OBS, IB0.2 e estações IM_INAG

Grid – Boxes

a)

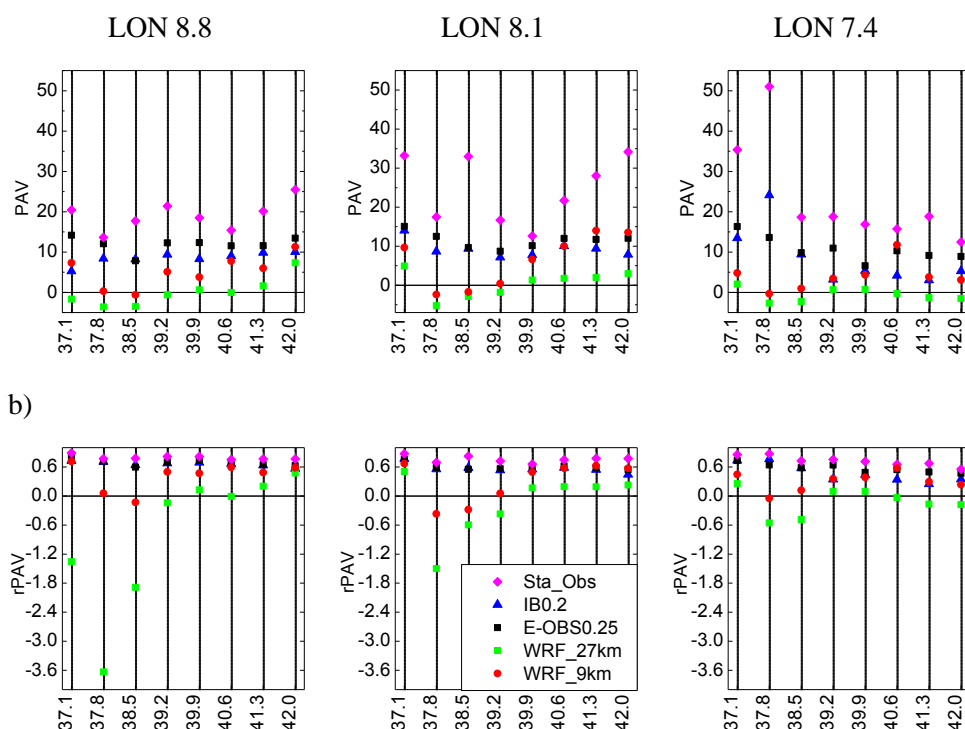


Fig. A7 – PAV e rPAV do máximo de p95 para a precipitação diária de Verão nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Max PAV; b) Max rPAV

a)

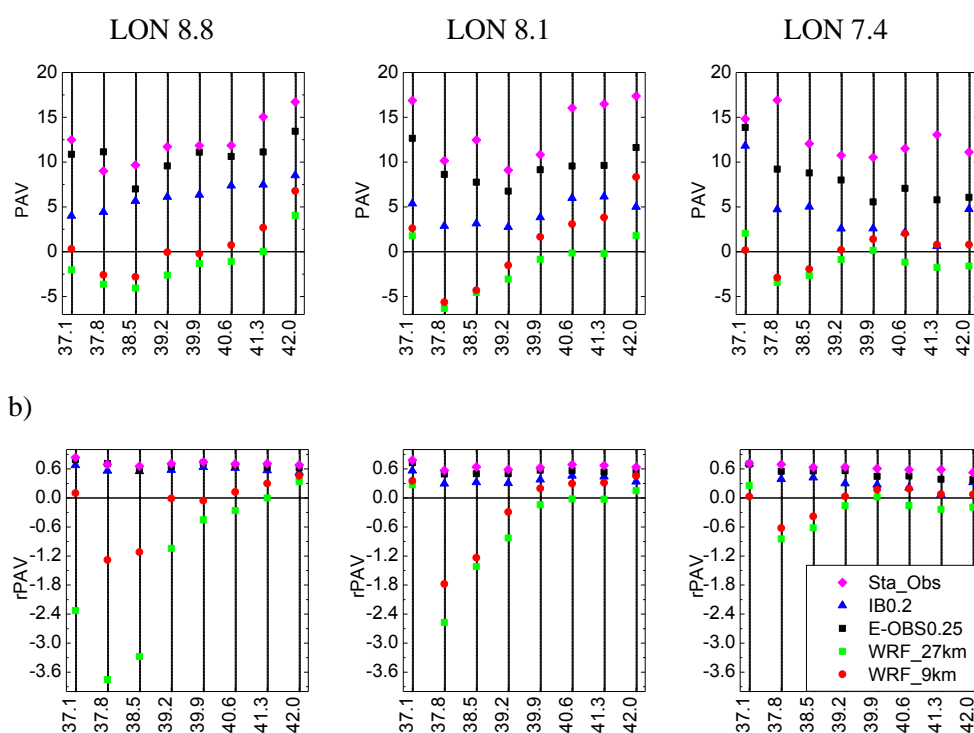


Fig. A8 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação diária de Verão nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Mean PAV; b) Mean rPAV

Regiões

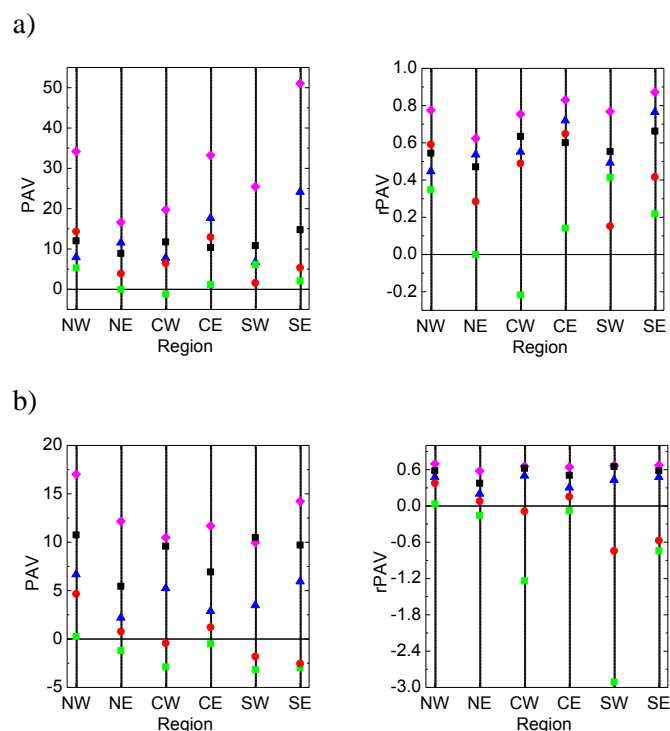


Fig. A9 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação diária de Verão nas seis regiões. a) Max PAV (à esq.) e Max rPAV (à dir.); b) Mean PAV (à esq.) e Mean rPAV (à dir.)

15 Dias

DJF

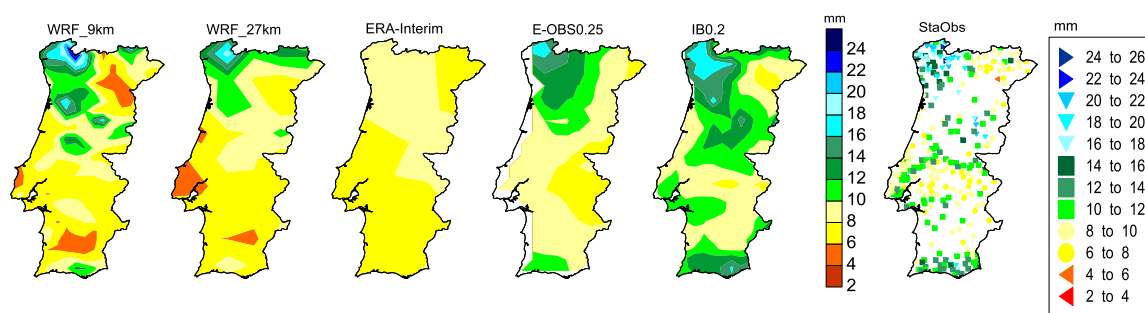
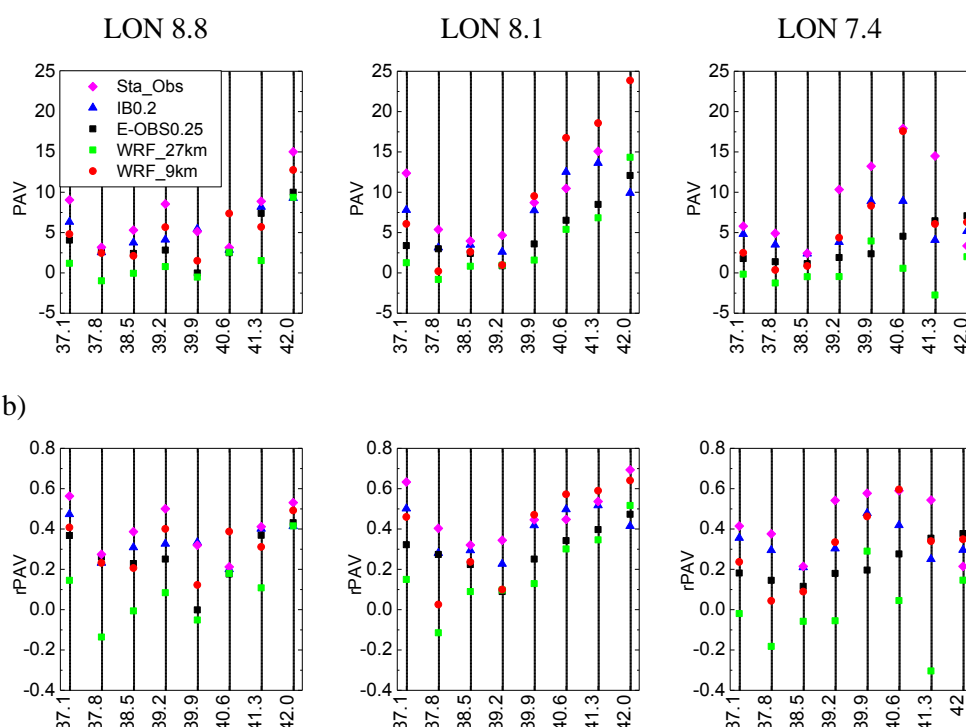


Fig. A9 – Percentil 95 da precipitação diária, média a 15 dias, de Inverno de cada domínio, grelhas de observação e estações: WRF 9km, WRF 27km, E-OBS, IB0.2 e estações IM_INAG.

Grid – Boxes

a)



b)

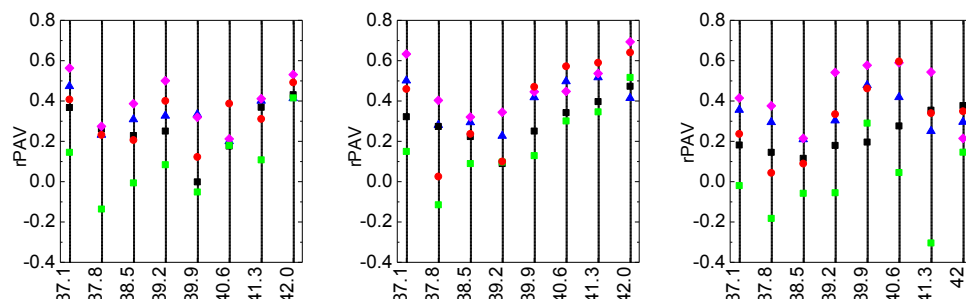
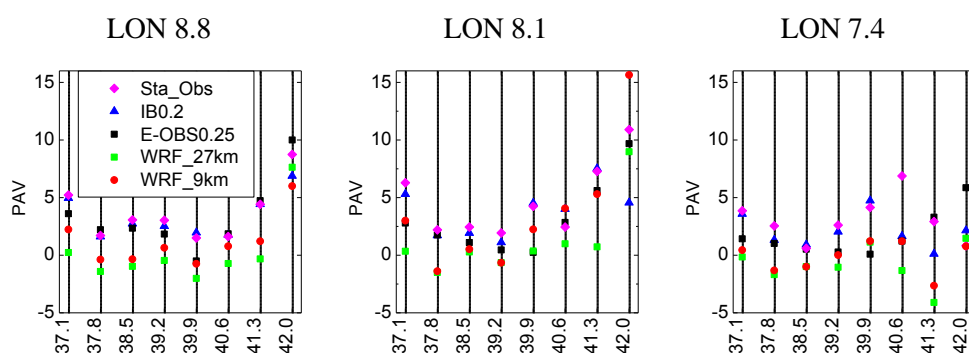


Fig. A11 – PAV e rPAV do máximo de p95 para a precipitação média a 15 dias de Inverno nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Max PAV; b) Max rPAV

a)



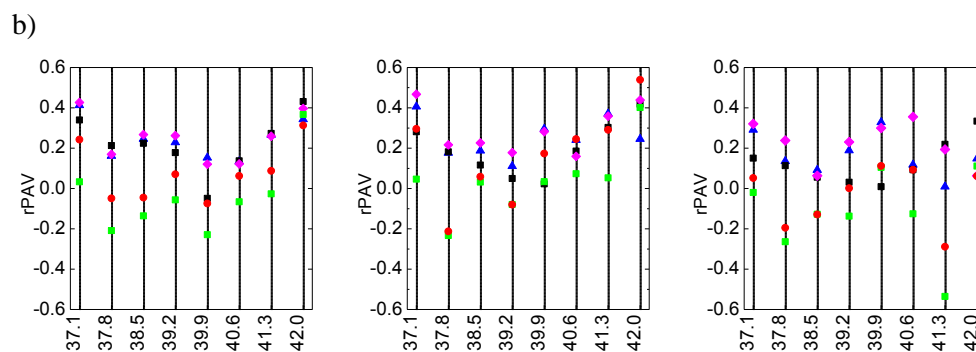


Fig. A12 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação média a 15 dias de Inverno nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Mean PAV; b) Mean rPAV

Regiões

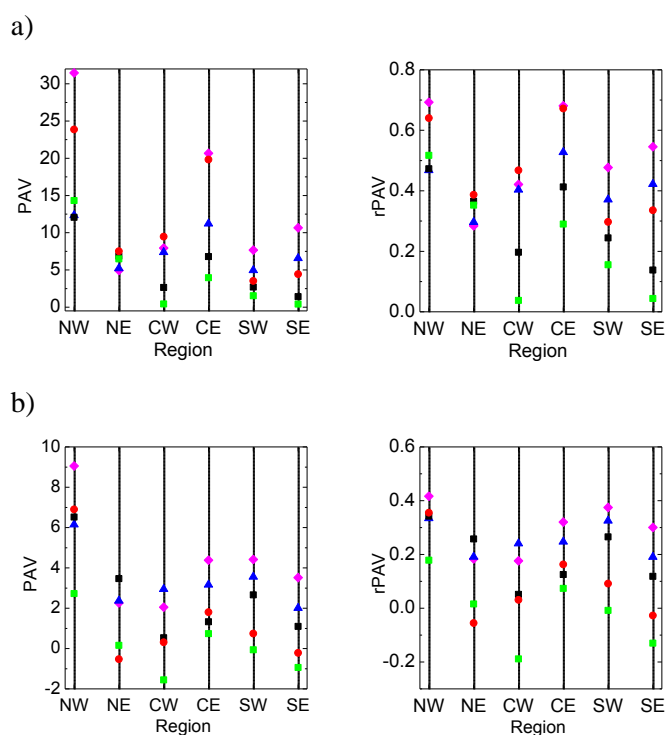


Fig. A13 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação média a 15 dias de Inverno nas seis regiões. a) Max PAV (à esq) e Max rPAV (à dir.); b) Mean PAV (à esq.) e Mean rPAV (à dir.)

JJA

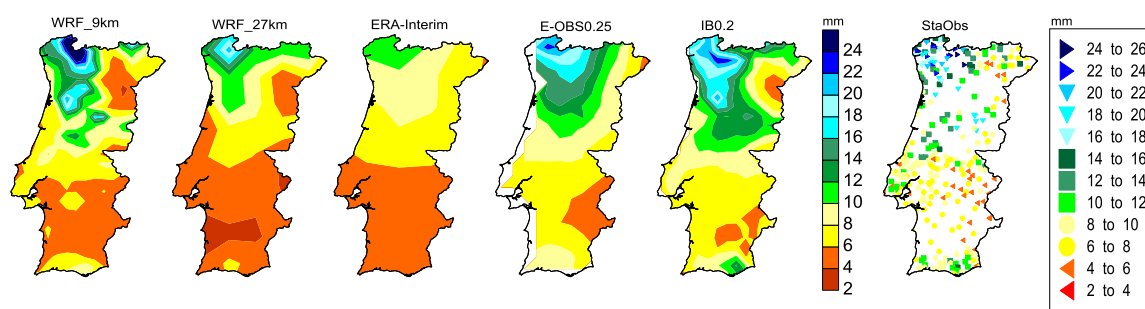


Fig. A14 – Percentil 95 da precipitação diária, média a 15 dias, de Verão de cada domínio, grelhas de observação e estações locais: WRF 9km, WRF 27km, E-OBS, IB0.2 e estações IM_INAG

Grid – Boxes

a)

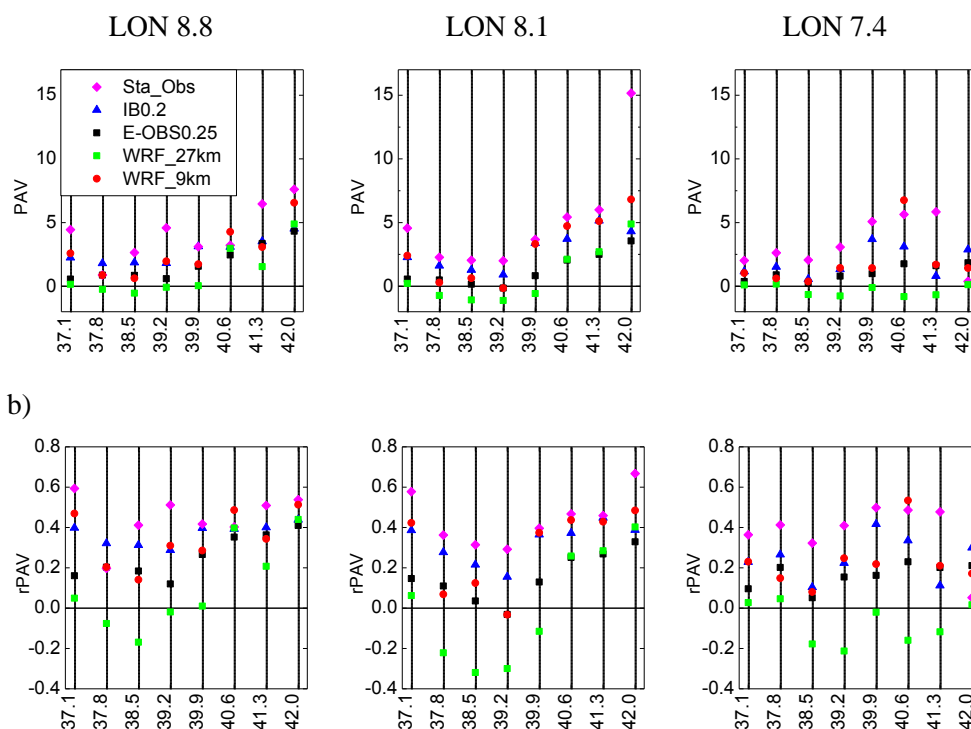


Fig. A15 – PAV e rPAV do máximo de p95 para a precipitação média a 15 dias de Verão nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Max PAV; b) Max rPAV

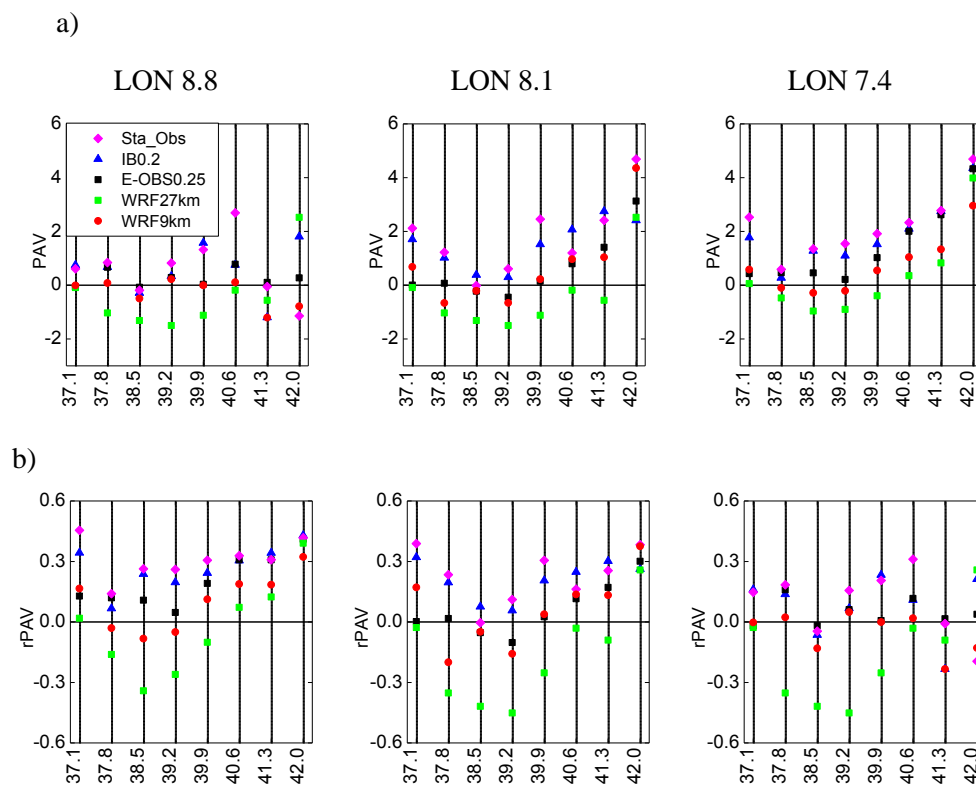
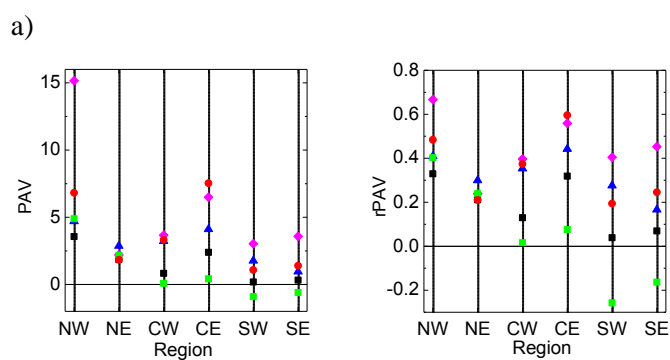


Fig. A16 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação média a 15 dias de Verão nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Mean PAV; b) Mean rPAV

Regiões



b)

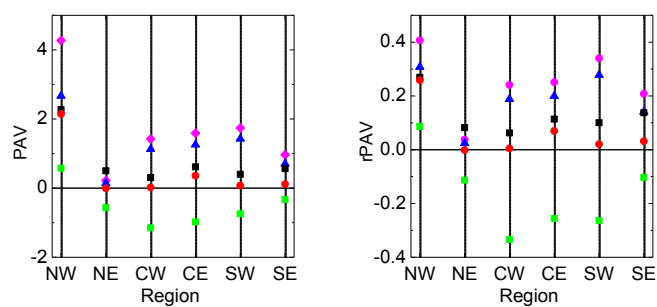


Fig. A17 – PAV e rPAV do p95 para a precipitação média a 15 dias de Verão nas caixas da ERA-I. Alinhadas em longitude (-8,8, -8.1 e -7.4) percorrendo em latitude. a) Mean PAV; b) Mean rPAV